

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Porovnávání přesnosti výroby kalibru pomocí různých
měřících metod

Production Accuracy Comparision of Caliper Using Different
Measuring Methods

Student:

Petr Staněk

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Čepová Lenka, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Kopie zadání...

Student:

Petr Staněk

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Porovnání přesnosti výroby kalibru pomocí různých měřicích metod
Production Accuracy Comparision of Caliper Using Different Measuring
Methods

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Obecná charakteristika daného problému.
3. Principy, metody měření a měřicí technika.
4. Experimentální část.
5. Zhodnocení experimentální práce, závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] OČENÁŠOVÁ, L. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline – Strojnícka fakulta - Dizertačná práca, 2008.
[2] PERNIKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno : VUT v Brně, 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
[3] ČEPOVÁ, L.; PETŘKOVSKÁ, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže FS VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřová, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 14. 5. 2017

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 14.5.2017


.....
podpis studenta.

Jméno a příjmení autora bakalářské práce:

Per Staněk

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Olešnice, 67974

Moravská strana 152,

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Staněk, P. *Porovnávání přesnosti výroby kalibru pomocí různých měřících metod: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 58 s. Vedoucí práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Bakalářská práce se věnuje porovnání přesností měření na optickém zařízení a na souřadnicovém měřícím stroji CMM. Porovnání zařízení bylo vyhodnoceno skrze geometrické tolerance válcovitosti, souososti a odchylek od průměrů zadaných výkresovou dokumentací. V úvodu byly obecně popsány geometrické tolerance a chyby s nejistotami vznikající při měření. V druhé části jsou popsány způsoby měření geometrických odchylek a také zařízení které se k tomuto účelu využívají. V experimentální části jsou popsány zařízení, na nichž měření proběhlo a srovnání naměřených hodnot pomocí tabulek a grafů. Závěr se zabývá celkovým zhodnocením použitých zařízení s jejich přednostmi, nevýhodami a porovnáním výsledků s výkresovou dokumentací.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

Staněk, P. *Production Accuracy Comparison of Caliper Using Different Measuring Methods: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering metrology, 2017, 58 p. Thesis head: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

The bachelor thesis deals with a comparison of measurement accuracy on an optical device and on a coordinate measuring machine (CMM). The comparison of devices was evaluated by geometric tolerances of cylindricity, coaxiality and deviations from averages assigned by a drawing documentation. Geometric tolerances and mistakes with uncertainties arising from the measurement were generally described in the introduction. Methods of measuring geometric variations and also devices which are used for that purpose are described in the second part. Devices which were used for the measurement and the comparison of measured values by tables and charts are described in the experimental part. The conclusion deals with the overall evaluation of used devices with their advantages, disadvantages and with the comparison of results with the drawing documentation.

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří především vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Čepové, Ph.D., za odbornou pomoc a rady při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za psychickou a finanční podporu při studiu.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
ÚVOD	11
1 Přehled geometrických vlastností součástí	12
1.1 Geometrické tolerance	12
1.1.1 Přímost.....	14
1.1.2 Rovinnost.....	15
1.1.3 Kruhovitost.....	15
1.1.4 Válcovitost.....	16
1.1.5 Tvar čáry (profilu).....	16
1.1.6 Tvar plochy.....	17
1.1.7 Sklon.....	17
1.1.8 Kolmost	18
1.1.9 Rovnoběžnost	18
1.1.10 Souosost.....	19
1.1.11 Soustřednost	19
1.1.12 Umístění	20
1.1.13 Souměrnost.....	20
1.1.14 Obvodové házení.....	21
1.1.15 Čelní házení.....	21
1.1.16 Celkové obvodové házení	22
1.1.17 Celkové čelní házení	22
1.2 Chyby a nejistoty při měření	23
1.2.1 Chyby měření	23
1.2.2 Nejistoty měření	24
2 Metody a zařízení používané k přesnému 3D měření součástí	26

2.1	Způsoby 3D měření.....	26
2.2	Destruktivní 3D přístroje.....	27
2.3	Optické 3D přístroje.....	27
2.4	Laserové 3D přístroje.....	28
2.5	Ultrazvukové 3D přístroje.....	29
2.6	Souřadnicové měřicí stroje CMM.....	30
2.6.1	Základní mechanické části CMM.....	31
2.6.2	Rozdělení dle konstrukce	32
2.6.3	Pohyblivé části CMM a jejich způsoby uložení.....	34
2.6.4	Snímací hlavice CMM.....	35
3	Experimentální část	36
3.1.1	ATOS Core 185.....	36
3.1.2	Wenzel LH65CNC X3M Premium	39
3.2	Vyhodnocení optické a dotykové metody.....	43
3.2.1	Porovnání naměřených hodnot vnější části kalibru.....	43
3.2.2	Porovnání naměřených hodnot vnitřní části kalibru.....	47
4	Závěr.....	51
	Seznam použité literatury.....	53
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	57
	Seznam příloh	58

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Δ	úchylka tvaru plochy skutečné od tvaru plochy jmenovité [μm]
CCD	Charge-coupled device
STL	Standard Triangulation Language
2D	Dvourozměrný
3D	3-Dimension (Trojrozměrný)
CAD	Computer aided design (Počítačem podporované projektování)
CMM	Coordinate measuring machine (Souřadnicový měřicí stroj)
CNC	Computer numeric control (číslicové řízení stroje)
MPEe	maximální dovolená chyba indikace CCM při měření rozměrů [μm]
MPEp	maximální dovolená chyba snímání [μm]
MPEthp	maximální dovolená chyb snímání při skenování [μm]
ΔCYL	odchylka válcovitosti [mm]
ΔCAX	odchylka souososti [mm]
TFL	Tolerance přímosti [mm]
TFE	Tolerance rovinnosti [mm]
TFK	Tolerance kruhovitosti [mm]
TFZ	Tolerance válcovitosti [mm]
TFP	Tolerance profilu podélného řezu[mm]
TLC	Tolerance tvaru čáry [mm]
TCE	Tolerance tvaru plochy [mm]
TPN	Tolerance sklonu [mm]
TPR	Tolerance kolmosti [mm]
TPA	Tolerance rovnoběžnosti[mm]
TPX	Tolerance různoběžnosti [mm]
TPC	Tolerance souososti [mm]
TPP	Tolerance umístění [mm]

TPS	Tolerance souměrnosti [mm]
TCR	Tolerance kruhového obvodového házení [mm]
TCA	Tolerance kruhového čelního házení [mm]
TCD	Tolerance házení v daném směru[mm]
TCTR	Tolerance celkového házení obvodového [mm]
TCTA	Tolerance celkového čelního házení [mm]
CYL1 – 10	Označení částí kalibru
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	International Organization for Standardization

ÚVOD

V dnešním rychle se rozvíjícím oboru strojírenství jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a přesnost výroby, která je v hodně případech požadována na micrometry. V důsledku těchto požadavků se rozvíjejí obory s nimi spojené. Strojní metrologie a výroba přesných měřících zařízení jsou jedny z nich. V posledních letech byl v tomto oboru zaznamenán velký pokrok, a proto nejsou výjimkou zařízení pracující s nejistotou měření řádově v jednotkách mikrometru. Metod a způsobů měření je nespočet. V dnešní době se ale dostává do popředí optická metoda, která má velikou výhodou v rychlosti měření, snadnosti provedení měření a v neposlední řadě širokým využitím naměřených dat. Dotykové metody však stále má svoji důležitost například ve firmách kladoucích do popředí vysokou přesnost oproti rychlosti, kterou nabízí optická. Jedním z hlavních zástupců dotykových metod jsou souřadnicové měřicí stroje.

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním přesnosti výroby kalibru pomocí rozdílných měřících metod, a to za pomoci optické a dotykové metody. V první části jsou popsány obecně geometrické tolerance dle normy ČSN EN ISO 1101 a chyby s nejistotami vznikající při měření. Druhá část se zabývá způsoby měření těchto geometrických tolerancí a odchylek vznikajících při výrobě. Dále tato část popisuje zařízení, které jsou k tomuto měření určené.

V experimentální části byly popsány použité zařízení, princip měření, jejich složení, výstupní data přístrojů, kalibrace zařízení a následný popis měření. Porovnání naměřených hodnot bylo uskutečněno pomocí odchylek tolerance válcovitosti, souososti a odchylek od průměrů zadaných výkresovou dokumentací měřeného kalibru.

Závěrečná část se zabývá zhodnocením přesnosti obou zařízení a časovou náročností měření.

1 PŘEHLED GEOMETRICKÝCH VLASTNOSTÍ SOUČÁSTI

Z důvodu plnění funkce vyrobené součásti, jsou požadovány správné polohy ploch geometrických tvarů a jejich směrů. Každý obrobek tvoří povrch s určitými geometrickými prvky. Ovšem v důsledku výroby a výrobních postupů vznikají určité odchylky od výkresové dokumentace, například souosost, válcovitost, nebo přesnosti zadaných rozměrů.

Při posuzování těchto odchylek, popřípadě nepřesností strojně vyrobené součásti je tato nepřesnost popisována jako rozdíl skutečné povrchové plochy od plochy geometrické. Geometrickou plochou rozumíme plochu, která je udávána v technické dokumentaci a určena předepsanými rozměry. Plochu, kterou nazýváme skutečnou vzniká v průběhu výroby a je popisována pomocí odchylek od jednotlivých ploch.

Definujeme je takto:

- Pomocí odchylek definovaných na základě mezních rozměrů určujeme odchylky od jmenovitých rozměrů.
- Největší naměřenou vzdáleností vrcholů od obalové plochy definujeme odchylky, které se liší od geometrického tvaru.
- Nepřesnost tedy odchylka obalové a jmenovité plochy je nazývána odchylka od vzájemné polohy.
- Drsnost povrchu určujeme jako nerovnosti skutečného povrchu, ovšem s velmi malými rozestupem. [2]

1.1 Geometrické tolerance

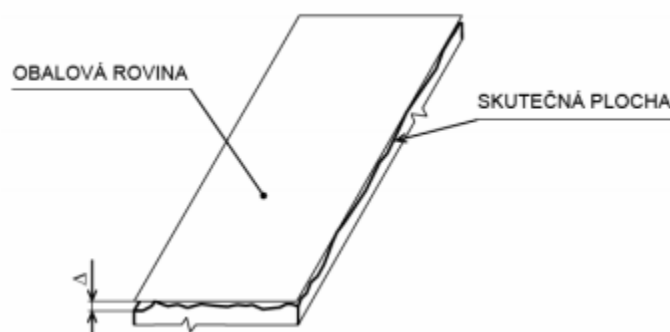
Plochy strojních součástí dodávané výrobou se liší od požadovaných geometrických tvarů. Tyto odchylky je možné zanedbat, pokud jsou v rámci povolených tolerancí. Pro tyto tolerance je určena Norma ČSN EN ISO 1101, která nám udává definici geometrické tolerance, která je určena jako pole s určitou tolerancí. V tomto poli se musí vyskytovat skutečný prvek strojní součásti. [4]

Tolerance pro geometrickou přesnost uváděné dle normy ČSN EN ISO 1101, jsou zobrazeny v tabulce č.1 – Tolerance geometrických přesností. [3]

Tab. č. 1 Tolerance geometrických přesností [3]

Název		ČSN	ISO	Značka
Tolerance vztahující se k jednomu prvku				
Tvaru	Přímosti	TFL	ST, STR	—
	Rovinnosti	TFE	FL, FLA	
	Kruhovitosti	TFK	CR, CIR	
	Válcovitosti	TFZ	CY, CYL	
	Profilu podélného řezu	TFP	-	
Tolerance vztahující se k jednomu prvku nebo dvěma (a více) prvkům				
Tvaru	Tvaru čáry	TCL	PL, PFL	
	Tvaru plochy	TCE	PS, PFS	
Tolerance vztahující se ke dvěma nebo více prvkům				
Směru	Sklonu	TPN	AN, ANG	
	Kolmosti	TPR	PE, PER	
	Rovnoběžnosti	TPA	PA, PAR, PRL	
	Různoběžnosti	TPX	-	
Polohy	Souososti	TPC	CA, CAX, COA	
	Soustřednosti	-	CO, CON	
	Umístění	TPP	PO, POS	
	Souměrnosti	TPS	SY, SYM	
Házení	Kruhového házení obvodového	TCR	CR, CRO	
	Kruhového házení čelního	TCA	AR, ARO	
	Házení v daném směru	TCD	-	
	Celkového házení obvodového	TCTR	TR, TRO	
	Celkového házení čelního	TCTA		

Tolerance a mezní úchytky vždy udáváme k geometrickým tvarům popisované součásti. Bohužel vzhledem k nepřesnosti výrobních zařízení nemají vždy vyrobené součásti přesné rozměry ani přesný geometrický tvar, který požadujeme. Z tohoto důvodu je neméně důležité tolerovat nejen rozměry, ale i polohu plochy tolerované součásti a její geometrické tvary. [2]



Obr. č 1 Skutečná plocha a obalová plocha [2]

Plocha skutečná – je to plocha která nám ohraničuje tvar součásti a vymezuje ji oproti okolí.

Plocha jmenovitá – plocha kterou považujeme za ideální, její tvar určuje výkresová nebo technická dokumentace.

Obalová plocha – nabývá tvaru jmenovité plochy dotýká se plochy skutečné a nachází se mimo materiál součásti.

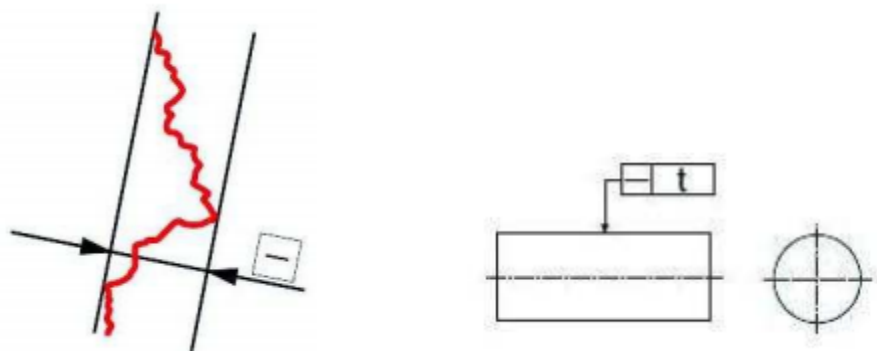
Odchylka plochy skutečné od plochy jmenovité (Δ) – tato hodnota nám udává vzdálenosti bodů s nejvyšší hodnotou z plochy skutečné od plochy obalové. Ve směru normály k obalové ploše.

Úchylka polohy – tato vzdálenost nám pomáhá vyjádřit polohu plochy nebo například čáry oproti poloze jmenovité, je udávána v délkových, popřípadě úhlových rozměrech vztaženým k námi zvoleným základnám.

Tvarová tolerance – hodnota největší dovolené odchylky tvaru. [2]

1.1.1 Přímost

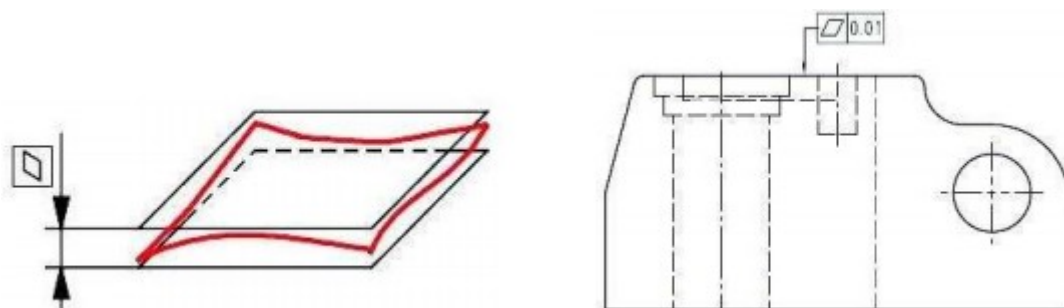
Charakterizujeme jako dvě rovnoběžné přímky, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance přímosti, která nám vymezují toleranční pole. [5]



Obr. č 2 Pole přímosti a zápis tolerance na výkrese [3]

1.1.2 Rovinnost

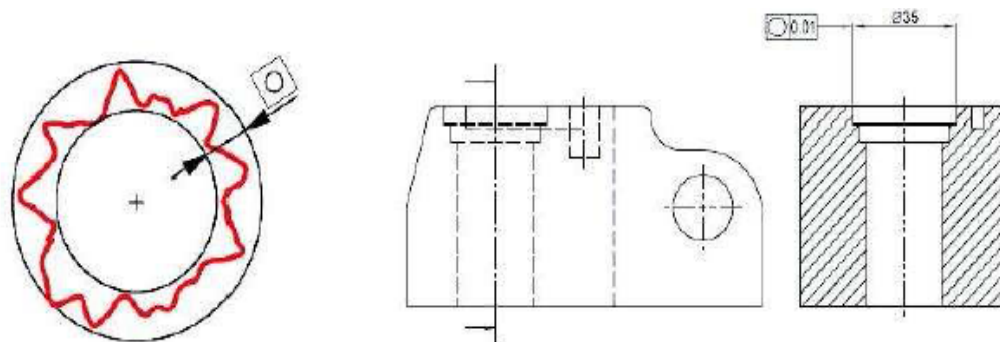
Jsou dvě rovnoběžné roviny vzdálené od sebe o hodnotu, která nám udává přípustnou hodnotu tolerance, při které bude stále dodržena rovinnost. Nazýváme jej toleranční prostor. [5]



Obr. č 3 Pole rovinnosti a zápis tolerance na výkrese [3]

1.1.3 Kruhovitost

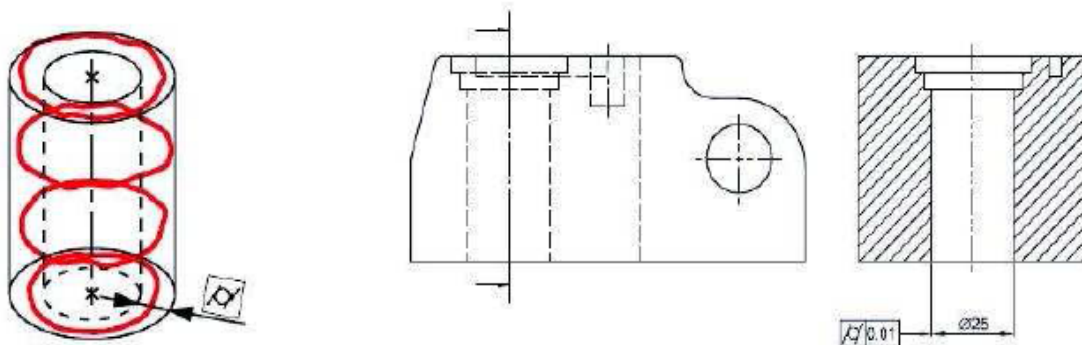
Dvě navzájem soustředěné kružnice, které jsou od sebe navzájem vzdálené o šířku mezikruží nám určují toleranci kruhovitosti. Tato tolerance nabývá hodnoty této šířky mezi kružnicemi, tyto kružnice nám zároveň vymezují toleranční pole. [5]



Obr. č 4 Tolerance kruhovitosti a její zápis na výkrese [3]

1.1.4 Válcovitost

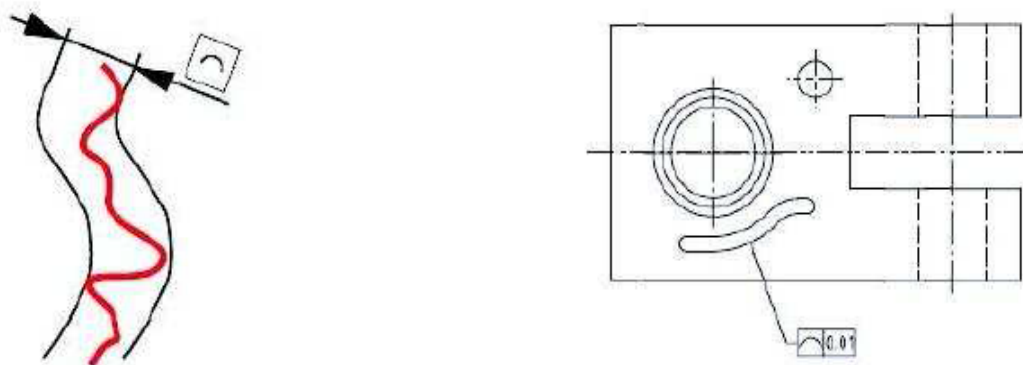
Toleranci válcovitosti nám udávají dva sousedé válce. Prostor, který vznikne mezi nimi nazýváme toleranční pole a tato hodnota vzdálenosti mezi nimi nám udává hodnotu tolerance. [5]



Obr. č 5 Zápis tolerance válcovitosti na výkrese [3]

1.1.5 Tvar čáry (profilu)

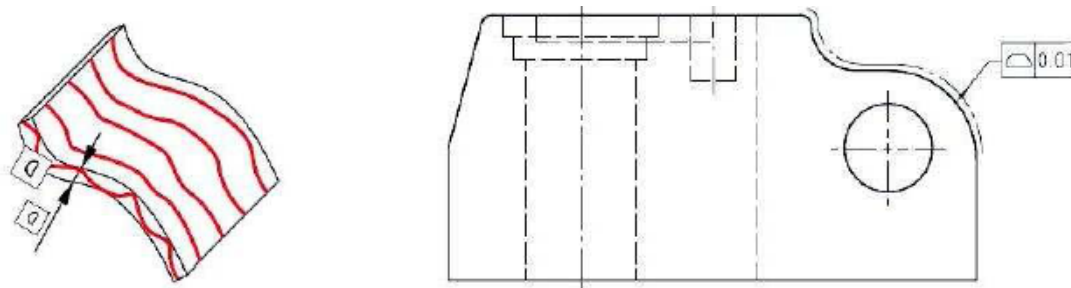
Dvě čáry ekvidistantně vzdálené od tvaru jmenovité čáry nám v rovině vymezují toleranční pole tvaru profilu. Hodnota kterou nám udává vzdálenost těchto čar je rovna hodnotě tolerance. [5]



Obr. č 6 Zápis tolerance na výkrese a znázornění tolerančního pole tvaru čáry [3]

1.1.6 Tvar plochy

Dvě plochy, ekvidistantně vzdálené od plochy jmenovité nám vymezují toleranční prostor a udávají toleranci tvaru plochy. [3]



Obr. č 7 Zápis tolerance na výkrese a znázornění tolerančního pole tvaru plochy [3]

1.1.7 Sklon

Dvě rovnoběžné roviny jsou od sebe vzdálené o toleranční hodnotu sklonu, zároveň svírají s základní přímkou či rovinou jmenovitý úhel α nám udávají prostor tolerance. [3]



Obr. č 8 Znázornění tolerance sklonu a zápis na výkresovou dokumentaci [5]

1.1.8 Kolmost

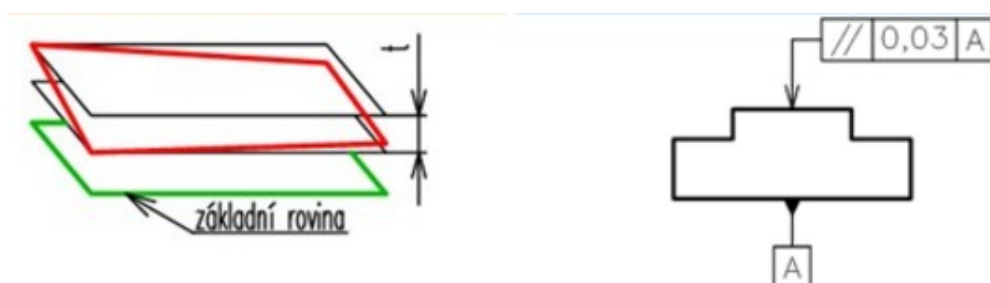
Prostor nacházející se mezi dvěma rovinami, které jsou kolmé na základní vztažnou rovinu udává rozmezí, které udává toleranční pole. Tedy hodnota vzdálenosti těchto dvou rovin je rovna hodnotě tolerance kolmosti. [5]



Obr. č 9 Ukázka tolerance kolmosti a zápis do výkresové dokumentace [5]

1.1.9 Rovnoběžnost

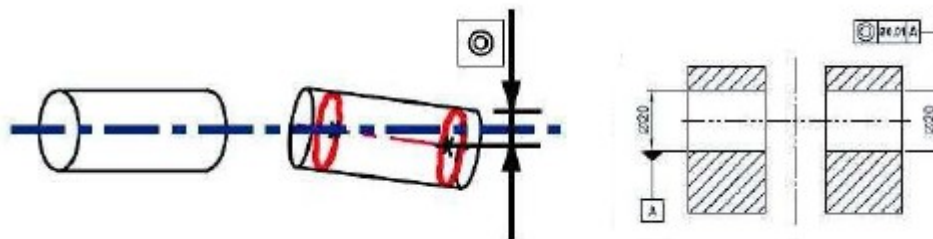
Skutečná plocha se nachází mezi dvěma rovinami, které jsou kolmé vůči základní vztažné rovině. Prostoru mezi těmito rovnoběžnými rovinami říkáme toleranční pole. Vzdálenost těchto na sebe rovnoběžných rovin je rovna hodnotě tolerance rovnosti. [3]



Obr. č 10 Ukázka tolerance rovnoběžnosti a zápis do výkresové dokumentace [5]

1.1.10 Souosost

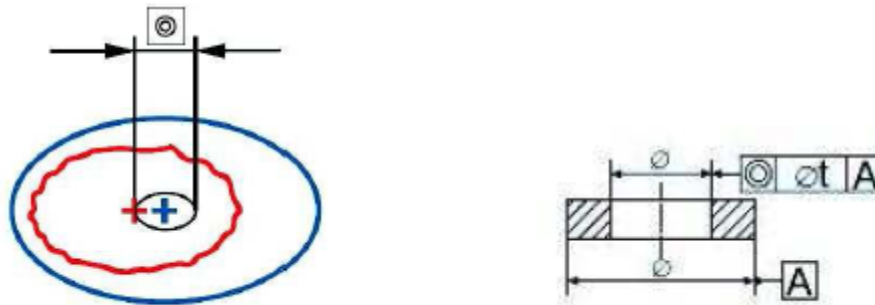
Pokud je použita k označení tolerance značka průměru. Tak máme omezený toleranční prostor válcem, který nabývá hodnoty rovné hodnotě tolerance souososti. Osa tohoto válce je shodná s osou základní. [3]



Obr. č 11 Značení tolerance souososti na výkresové dokumentaci [3]

1.1.11 Soustřednost

Kruhové pole, v němž se může nacházet střed prvku ke kterému přiřazujeme toleranci například kruh nabývá stejné hodnoty jakou je předepsaná hodnota tolerance soustřednosti. Toto pole nazýváme polem tolerančním. Tento kruh má střed shodný se středem základního prvku. [3]

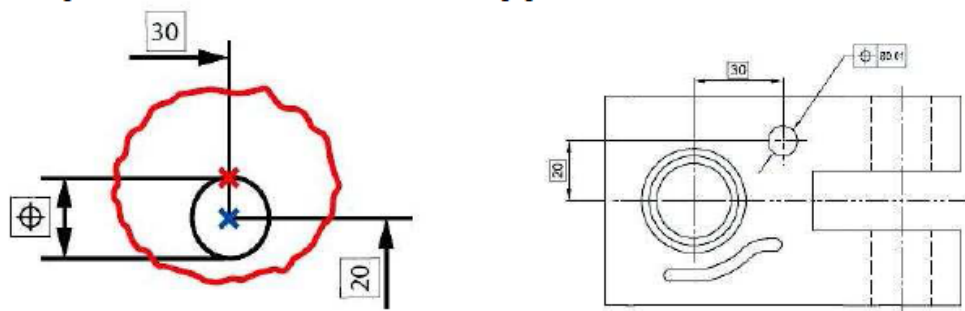


Obr. č 12 Značení tolerance soustřednosti na výkresové dokumentaci [3]

1.1.12 Umístění

Osa tolerovaného prvku značena značkou příslušnou průměru se musí nacházet uvnitř tolerančního pole ve tvaru válce s průměrem shodným této tolerance. [3]

Br.

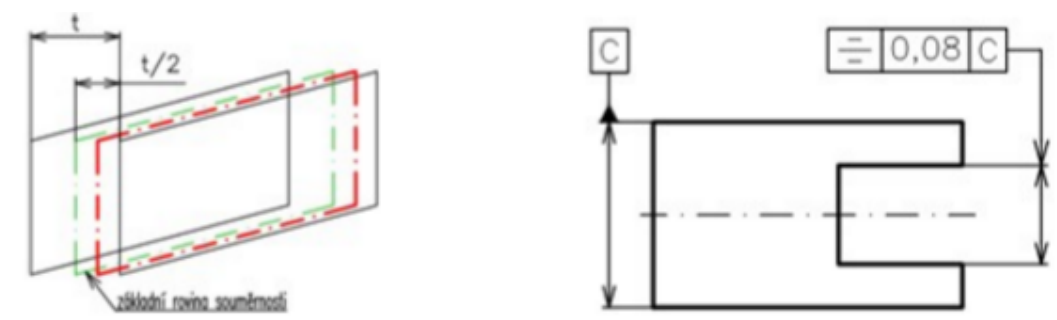


Obr. č 13 Zobrazení tolerance umístění na výkresové dokumentaci [3]

1.1.13 Souměrnost

Vzdálenost dvou na sebe rovnoběžných rovin je rovná hodnotě vzdálenosti tolerance. Mezi těmito rovinami se nachází rovina souměrnosti. [5]

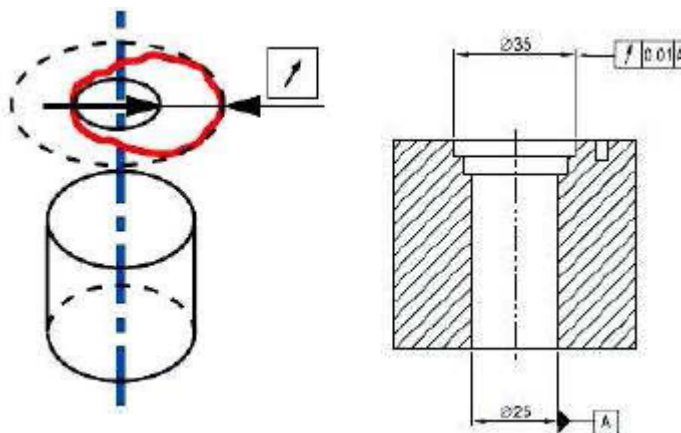
obra



Obr. č 14 Zobrazení tolerance souměrnosti na výkresové dokumentaci [5]

1.1.14 Obvodové házení

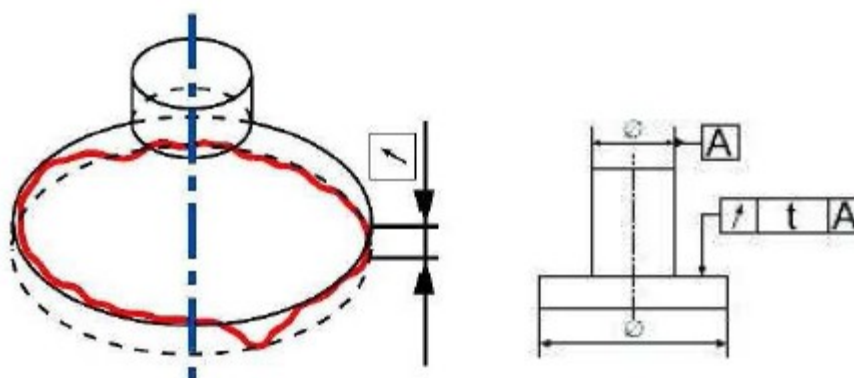
Dvě soustředné kružnice kolmé k ose vymezují toleranční pole. Jejich vzdálenost má hodnotu tolerance házení válce v jakékoli radiální poloze. Osa tohoto válce je stejná jako základní osa prvku. [3]



Obr. č 15 Zobrazení tolerance obvodového házení na výkr. dokumentaci [3]

1.1.15 Čelní házení

Vzdálenost dvou kružnic vymezuje toleranční pole a udává nám hodnotu tolerance. Tato tolerance udává hodnotu házení na válci v jakékoliv radiální poloze. Osa válce je stejná jako základní osa prvku. [3]

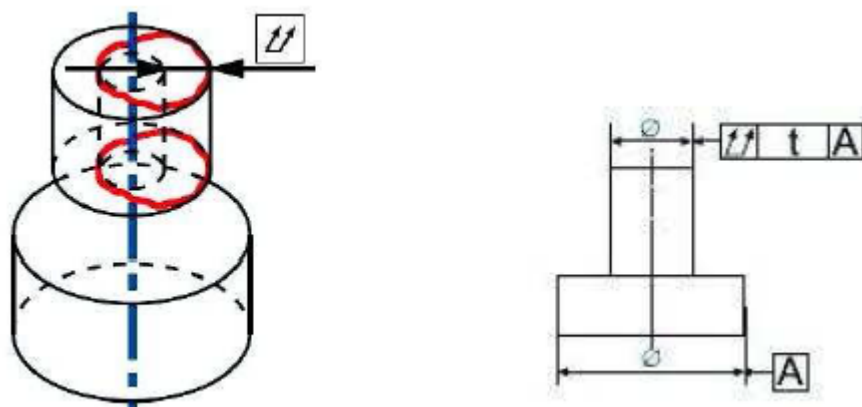


Obr. č 16 Znázornění tolerance čelního házení na výkr. dokumentaci [3]

1.1.16 Celkové obvodové házení

Dva vzájemně souosé válce vymezují toleranční prostor. Vzdálenost mezi těmito válci je shodná s hodnotou tolerance celkového obvodového házení. Osa těchto

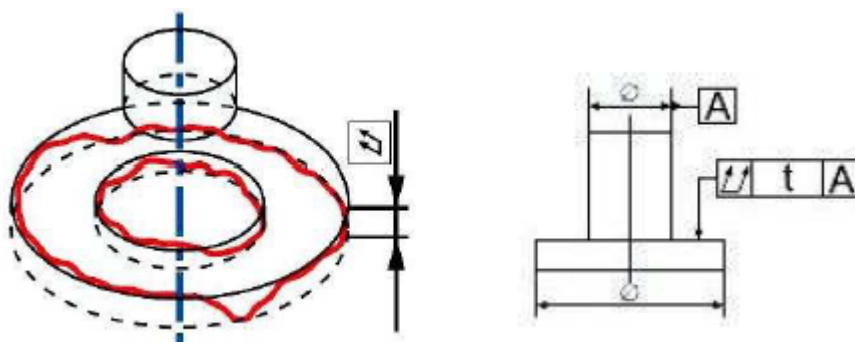
je shodná se základní osou prvku. [3]



Obr. č 17 Znázornění tolerance celkového obvodového házení [3]

1.1.17 Celkové čelní házení

Dvě vzájemně rovnoběžné roviny vymezují toleranční prostor. Vzdálenost mezi těmito rovinami je hodnotou rovné celkovému čelnímu házení. Tyto roviny jsou rovněž kolmé k základní ose prvku. [3]



Obr. č 18 Znázornění tolerance celkového čelního házení [3]

1.2 Chyby a nejistoty při měření

1.2.1 Chyby měření

V praxi se nesetkáme s metodou či přístrojem pracujícím bez vzniku chyb.

Nejsou tedy absolutně přesné. Tyto chyby rozdělujeme na: - hrubé,

- systematické,

- náhodné.

Hrubé chyby

Jejich vznik zapříčiňuje nesprávné provedení měření, chybné odečtení údajů, špatným použitím přístroje nebo vadou měřícího přístroje. [13]

Způsob testování odlehlé hodnoty, když neznáme směrodatnou odchylku střední hodnoty je následující.

Z všech námi naměřených hodnot $x_1 < x_2 < x_n$ vypočítáme střední hodnotu. [13]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Kde je:

\bar{x} – střední hodnota,

n – rozsah zvoleného výběru,

Dále vypočteme výběrovou směrodatnou odchylku.

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Kde je:

s(x) – výběrová směrodatná odchylka,

\bar{x} – střední hodnota,

x_i – naměřená hodnota,

n – rozsah zvoleného výběru.

Dále vypočítáme normované hodnoty H_2 , H_n ($x_2 < \bar{x}$, $x_n > \bar{x}$) díky kterým posoudíme odlehlost hodnot (x_2, x_n). [13]

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (3)$$

Kde je:

H_2 , H_n – normované hodnoty,

$s(x)$ – výběrová směrodatná odchylka,

\bar{x} – střední hodnota,

x_i – naměřená hodnota,

n – rozsah zvoleného výběru.

Následně se pomocí tabulek určí mezní hodnota H pro předem určenou pravděpodobnost pro počet měření n . Pokud je $H_2 < H$ a $H_n < H$ tak je hodnota x_n zatížena chybou a vylučuje se z naměřených hodnot, naopak hodnota H_2 zatížena není a ponechává se. [13]

Chyby systematické

Příčiny vzniku, kvůli kterým systematické chyby vznikají působí jednoznačně a soustavně, jak ve smyslu, tak i ve velikosti. Tato chyba se dá odhalit změnou měřících poměrů. Podle rozpoznatelnosti je dělíme na *zjistitelné* (mají konkrétní hodnotu a znaménko) a *neznámé* (bez konkrétního znaménka či hodnoty). [13]

Chyby náhodné

Jak název napovídá jsou způsobeny náhodou. Při jakémkoli měření určité hodnoty nebo veličiny se vyskytují náhodné chyby a ovlivňují nám naměřené hodnoty. [13]

1.2.2 Nejistoty měření

Nejistotou měření nazýváme rozsah hodnot, které se pohybují v okolí výsledné hodnoty měření. Tato nejistota se týká výsledku měření, hodnot odečtených z používaných přístrojů, hodnot námi použitých konstant, atd. na nichž závisí nejistota měření. Dnes se vyhodnocování naměřených hodnot provádí spíše vyjádřením nejistot měření nežli chyb. [13]

Nejistota typu A (u_A):

- získáme opakovaným měřením
- čím vyšší počet měření, tím nižší nejistota
- pokud provádíme nezávislé měření hodnot, tak se nejistota typu A váže k výběrovému průměru a zjistíme ji výpočtem směrodatné odchylky $s(\bar{x})$: [13]

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n * (n-1)}} \quad (4)$$

Nejistota typu B (u_B):

- hodnota nejistoty nezávisí na počtu měření
- nejistotu určíme pomocí metody určení nejistoty vázané na výběrový průměr, která je určena jiným způsobem nežli výpočtem směrodatné odchylky z opakovaných měření: [13]

$$u_B(X) = \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2} \quad (5)$$

Kde je: u_{Bi}^2 - kvadrátový součet všech zdrojů nejistot typu B [13]

Kombinovaná nejistota typu C (u_c):

- je kladným odmocněním součtu nejistot typu A a B

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (6)$$

Rozšířenou kombinovanou nejistotu vyjadřujeme pomocí vztahu:

$$U_c = k_u * u_c \quad (7)$$

Kde je:

U_c – rozšířená kombinovaná chyba,

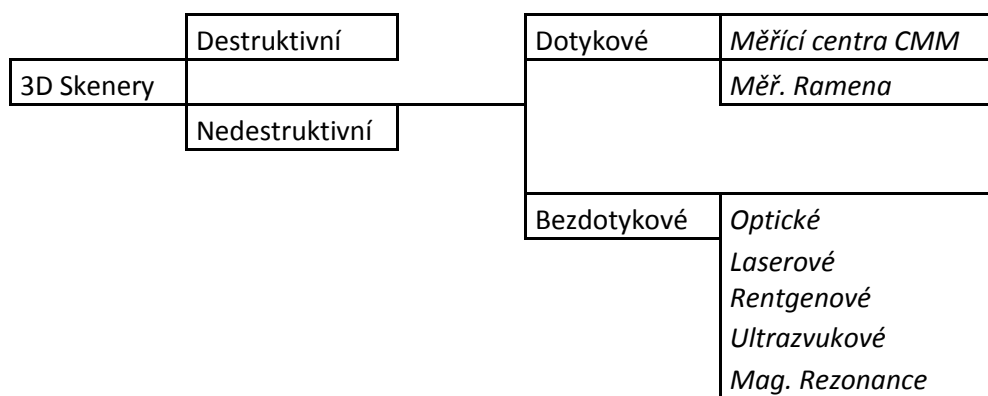
u_c – kombinovaná nejistota,

k_u – koeficient pokrytí (rozšíření). [13]

2 METODY A ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÉ K PŘESNÉMU 3D MĚŘENÍ SOUČÁSTÍ

2.1 Způsoby 3D měření

Základní rozdělení dle způsobu měření neboli dle použitého senzoru je na skupiny kontaktní a bezkontaktní (Obr. č. 19). Jak názvy napovídají u kontaktní metody se měří fyzickým dotykem s objektem. Naopak u bezkontaktní metody se používá optický způsob, tedy způsob promítání světla o určité vlnové délce. Existují samozřejmě i kombinace těchto metod, kde se skenuje za pomoci dotykové sondy. Polohu této sondy ovšem snímáme opticky. Metody volíme dle požadovaného měření. Pokud požadujeme rychlost měření s ní i nízkou ekonomickou náročnost je příklon spíše k optice. Zde ovšem z důsledku světelných podmínek nemusíme dosáhnout přesnosti jako u dotykové metody. S postupným vývojem technologií ovšem tyto nevýhody optických snímačů minimalizujeme. Jako příklad nám poslouží optický skener od firmy ATOS GOM, který využívá technologii modrého světla. Díky které jsme schopni snímat objekty bez ovlivnění světelnými podmínkami, nebo lesknoucí se povrch. Dále se dělí optické metody na aktivní a pasivní skupiny. Pokud používáme laserovou či rentgenovou metodu, je zapotřebí vysílač zařízení o určité vlnové délce a poté i přijímač pro odražené paprsky. Aktivní přídomek mají tedy díky vlastnosti, že vysílají signál (záření). Pasivní naopak pouze snímají paprsky od okolních zdrojů. [1] [2]



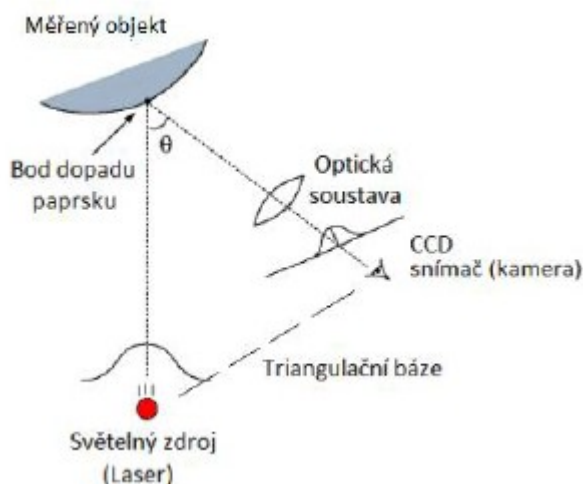
Obr. č 19 Rozdělení 3D měření [1]

2.2 Destruktivní 3D přístroje

Tento typ skenování nepatří k hojně užívaným, a to z důvodu že skenováním poškodíme objekt či jeho část. Svoje uplatnění si ovšem nachází. Složen je prakticky z kamery připevněné na frézce. Před měřením zalejeme celý měřený objekt či jeho část do bloku kontrastního materiálu. Musíme si být jistí, že tento materiál vyplní všechny skuliny. Poté díl upneme na desku frézky a následuje frézování tenkých vrstev stejné tloušťky. Každá nově vzniklá vrstva je poté vyfocena a zapsána s souřadnicí osy Z. Výsledkem měření jsou tedy 2D fotografie s informací o hloubce řezu. Ty poté systém zpracovává a z přechodu barev mezi kontrastním a základním materiálem vytvoří okrajovou křivku. Tato křivka nám tedy udává body v příslušné rovině. V konečné fázi systém spojí všechny křivky ze všech hladina a vytvoří nám mrak 3D bodů. Takto skenovaný díl zničíme nebo poškodíme. Výhodou je nízká ekonomická náročnost. [9]

2.3 Optické 3D přístroje

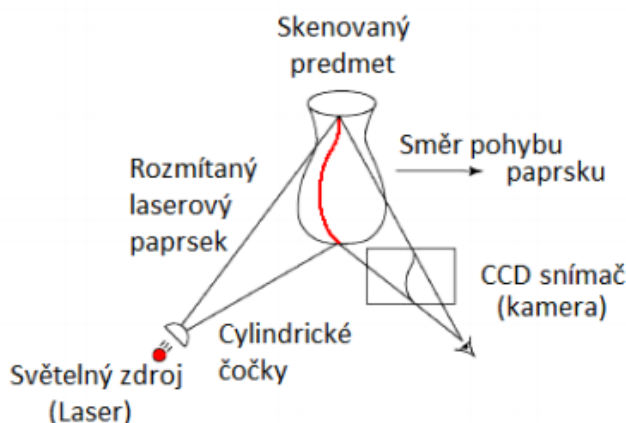
Nespornou metodou tohoto typu je rychlost měření. Skener je schopen snímat celou plochu objektu naráz a ukládat hodnoty v různých formátech. Nevýhodou ovšem zůstává že systém nerozpoznává průchozí díry. Při experimentální části jsem využíval přístroj od firmy GOM, typu ATOS Core 185. Jednou z nejvíce využívaných optických aktivních metod je metoda „Time of flight“. Funguje na principu, že přístroj počítá čas letu paprsku od vyslání k odrazení od předmětu, až po příchod odraženého paprsku na přijímač. Další metodou je triangulace, anglicky „Triangulation“. Ta funguje na principu nasvícení objektu za pomoci LED diody nebo laseru. Ve stejném okamžiku je objekt snímán CCD kamerou (Obr. č.20). Jedná se o aktivní triangulaci neboli 1D triangulaci, která promítá pouze světelný paprsek. [10]



Obr. č 20 Aktivní triangulace [10]

2D Triangulace

Objekt je ozářen laserovým pruhem, který je jak u 1D triangulace snímán CCD kamerou. Laserový pruh se při měření pohybuje po povrchu objektu. Elektricky ovládané zrcadlo, které je umístěné za optickou soustavou a laserovým emitorem nám vychyluje laserový pruh. Díky tomu získáme velké množství snímků, díky kterým dokáže software složit 3D povrch objektu (Obr.č. 21). [10]



Obr. č 21 2D Triangulace [14]

3D Triangulace

Na měřený objekt je promítán světelný vzor za pomoci projektoru. Vzory mohou být různé od pruhů, kruhů, čtverců, křivek, mřížek, atd. Mohou mít také různou barvu.

Díky deformaci tohoto světelného vzoru na skenovaném objektu se určí 3D tvar objektu (Obr. č. 22). [10]



Obr. č 22 3D Triangulace [10]

2.4 Laserové 3D přístroje

Patří k hojně využívaným metodám, a to v mnoha podobách. Příkladem rozšíření skenovací hlavy u mechanických skenerů nebo jako samostatná snímací zařízení. Obdobně jako u optických se pracuje s odrazením paprsku od skenovaného objektu a snímáním CCD kamerou. Jedná se o velice přesný způsob měření z důvodu, že paprsek

je odražen až 1000 krát za sekundu. Rozdílem je, že snímací kamera je od objektu vzdálená na menší vzdálenost oproti optickému měření. V důsledku to znamená, že zabíráme menší plochu objektu. Objekt nebo skener se musí tedy otáčet. Při využití ručního skeneru, kde není známa poloha skeneru, řešíme tento problém metodou „trackování“ nebo za pomoci referenčních značek. Princip „trackování“ je založen na použití dalšího optického zařízení, které nemění polohu. Na používaném laserovém skeneru jsou umístěny reflexní body (zrcátka), které jsou sledovány přidaným optickým zařízením. Toto „trackovací“ zařízení sleduje polohy reflexních bodů v prostoru. Díky této známe poloze je systém schopen dopočítat polohy bodů na povrchu měřeného objektu. Jedná se o efektivní způsob, jelikož nevyžaduje přípravu objektu před měřením. Ovšem pořizovací náklady oproti metodě referenčních značek jsou vyšší. Při využití této metody je před skenováním nutné na objekt umístit zmíněné referenční značky. V takovém množství, aby při záběru byly snímány minimálně tři (Obr. č. 23). [9] [10]



Obr. č 23 Laserová metoda referenčních značek [9]

2.5 Ultrazvukové 3D přístroje

Jedná se o bezkontaktní snímání ultrazvukovou sondou. Měření se provádí ručně pistolí s hrotem z kovu, který přikládáme povrchu. Stiskem spouště pistole je vyslán ultrazvukový signál. Ten je následně dekodován čidly a zapsán jako souřadnice. Přístroje mají malou přesnost a to v rozsahu 0,3 – 0,5 mm. Proto se dnes již prakticky nevyužívá. [9]

2.6 Souřadnicové měřicí stroje CMM

Metod používaných k 3D měření nebo skenování součástí, je nespočetně. Vyzdvihnout některou z nich ovšem nejde. Důvodem je, že kterákoli z těchto metod má svoji určitou oblast aplikace. Příkladem může být použití pro přesné měření, rychlost měření a rozměry objektu, citlivost objektu na dotek sondy, členitost měřené plochy, či ekonomický aspekt. Řešením může být například souřadnicový měřicí stroj zvaný zkratkou CMM.

Tyto stroje nám jsou schopny určit prostorové body na povrchu součásti, které se nasnímají za pomoci snímačů.

Jakmile dojde k dotyku snímače s povrchem součásti, tak senzor zaznamená vychýlení a zaznamená do paměti aktuální polohu kuličky. Body udává v souřadném systému. Nevýhodou ovšem je, že celý proces je náročný na čas. CMM využívá dva typy těchto systému (Obr. č. 24) a těmi jsou:

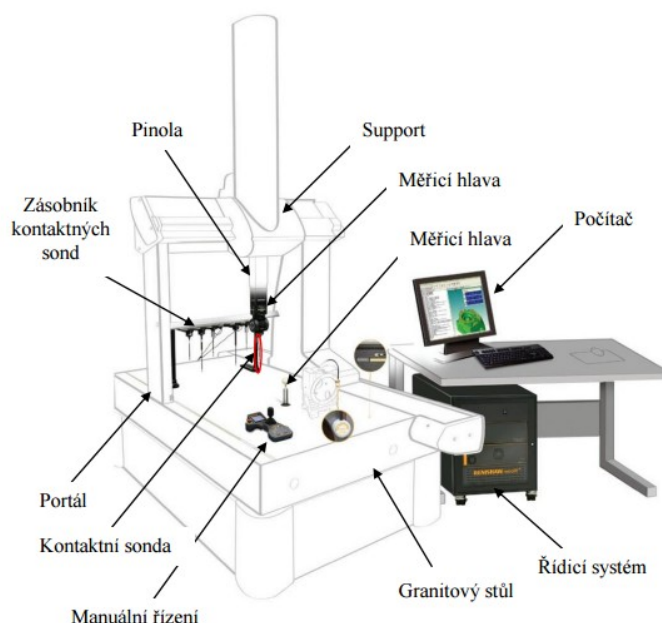
- souřadnicový systém stroje (osy X_G , Y_G , Z_G)
- souřadnicový systém měřeného objektu (osy X_W , Y_W , Z_W)



Obr. č 24 Souřadnicový systém přístroje a měřeného objektu [10]

2.6.1 Základní mechanické části CMM

Každý CMM je tvořen několika částmi neboli díly, které jsou k sobě navzájem propojené a fungují jako celek. Jsou jimi například systém pro odměřování, řídicí systém, systém pro snímání, výměník snímačů, software přístroje, pohonný systém suportu (pokud se nejedná o skenování ruční), počítač, atd. (Obr. č. 25).[1] [10]



Obr. č 25 Standartní uskupení CMM přístroje [11]

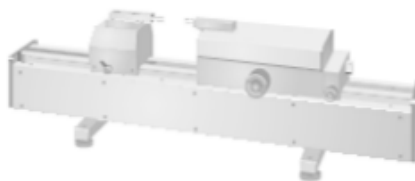
Jak bylo zmíněno výše, CMM přístroje mají širokou škálu využití. Mezi základní příklady využití patří:

- měření vzdálenosti dvou definovaných bodů,
- sestavení obrysové křivky ze získaných bodů,
- měření v osách „x“, „y“ a „z“,
- schopnost absolutního a inkrementálního způsobu měření,
- určení odchylek polohy a tvaru (oproti CAD modelu),
- automatizované porovnání hodnot s zadaným modelem,
- výpočet středů a průměrů děr, průsečíků os,
- vyhodnocení klonu osy díry, středu oblouku,
- automatizovaná korekce za pomoci dotyku,
- práce s kartézskou, polární soustavou,
- kontrola součástek (rozměry, odchylky od zadaného CAD modelu). [1] [10]

2.6.2 Rozdělení dle konstrukce

CMM přístroje rozdělujeme dle dvou kritérií těmi jsou metody měření a konstrukce přístroje do několika skupin. Konstruktivní řešení přístroje nám rozděluje CMM na tři základní skupiny.

- **Jednosouřadnicový měřicí přístroj** (Obr. č 26) - možnost měřit pouze v jedné ose. Výhodou je přesnost přístroje a tu zachovává i při velkých rozměrech měřených objektů. Chyba se kterou přístroj pracuje se pohybuje v rozmezí $0,6 - 6 \mu\text{m}$. Nevýhodou je pak limitování měření v jedné ose.



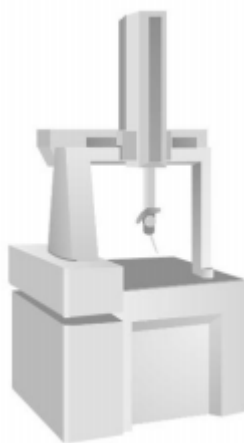
Obr. č 26 Jednosouřadnicový měřicí přístroj [10]

- **Dvousouřadnicový měřicí přístroj** (Obr. č.27) – měření probíhá ve dvou na sebe kolmých osách v jedné námi zvolené rovině. Například osy „x“ a „y“. Pro měření ve 2D používáme skenery, profilprojektory, lasery, nebo mikroskopy s optoelektronickým odměřovacím systémem nebo CCD kamerou. Používá se k měření tvarově jednodušších objektů. Výhodou jsou nižší pořizovací náklady oproti třísouřadnicovému přístroji.



Obr. č 27 Dvousouřadnicový měřicí přístroj [10]

- **Třísouřadnicový měřicí přístroj** (Obr. č.28) – měření probíhá pomocí třech os („x“, „y“ a „z“), které jsou navzájem kolmé. Tato konstrukce přístroje umožňuje měřit tedy prostorově. Díky tomu snadno změříme tvarově složité objekty při zachování přesnosti. Nevýhodou mohou být vyšší pořizovací oproti dvou předchozím typům. Výhodou pak naopak všestrannost měření a možnost měřit na jedno upnutí. [1] [10]

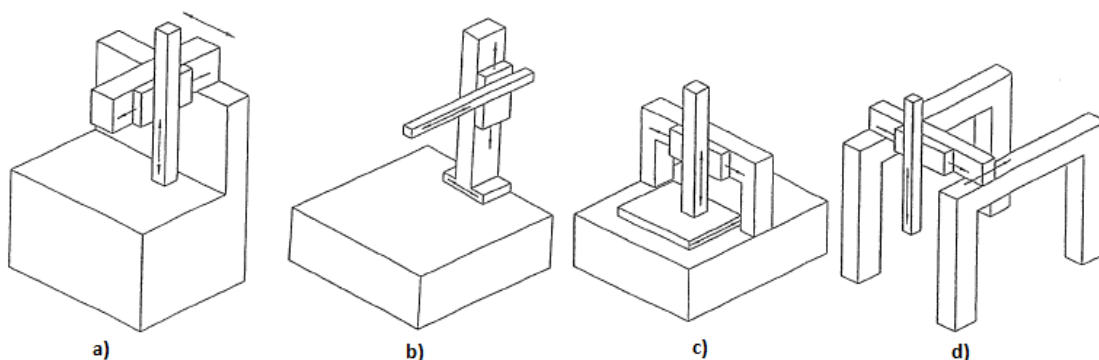


Obr. č 28 Třísouřadnicový měřicí přístroj [10]

- **Multisenzorový souřadnicový měřicí přístroj:** jedná se o kombinované použití různých měřících sond k měření objektu. Příkladem skenovací sonda, optická sonda, mechanický spínač, mikrosonda, atd.

V dnešní době existuje bezpočet typů konstrukcí CMM od ručních, stolních přístrojů po velké mostové CMM používané v automobilovém a leteckém průmyslu. Ovládání je od manuálního až po různé stupně automatizovaného měření. Ve většině případů je využíváno konstrukčního řešení za pomoci kartézského (polárního) souřadného systému. Norma ČSN EN ISO 10 360 – 1 dělíme CMM na čtyři geometrické uspořádání:

- výložníkové (Obr. č. 29a),
- stojanové (Obr. č. 29b),
- portálové (Obr. č. 29c),
- mostové (Obr. č. 29d).

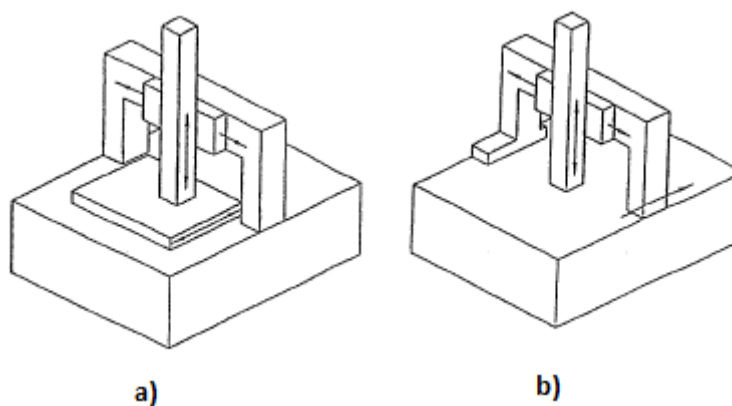


Obr. č 29 Základní geometrické uspořádání CMM [16]

Výložníkové uspořádání CMM: objekt, který máme v úmyslu měřit upínáme na desku stolu. Pinola přístroje se pohybuje v ose „y“, která je kolmá k ose „x“. Z důvodu změny vyložení pinoly od vodící plochy je zapotřebí vyvažování. Tak zachováme přesnost měření. Osa „y“ v níž se provádí měření má z důvodu tuhosti malý rozsah. Výhodou je dobrý přístup k měřenému objektu. Tímto způsobem je výhodné měřit dlouhé a úzké předměty. [1] [11]

Stojanové uspořádání CMM: obdobně jako u výložníkového typu je měřený objekt upnut ke stolu. Měřený objekt se pohybuje v osách „x“ a „y“. V ose „z“ obstarává pohyb měřící pinola. Tento konstrukční typ se řadí k nejpřesnějším, jsou vhodné pro měření malých rozsahů. Výhodou je tuhá konstrukce a výborný přístup k měřenému objektu. Příhodnou úpravou je dovybavení přístroje stolem ve tvaru kruhu s úhlovou stupnicí. [1] [10] [16]

Portálové uspořádání CMM: jedná se o nejrozšířenější typ souřadnicového měřicího přístroje, užívaného pro měření středních a velkých rozsahů. Výhodou je vysoká tuhost konstrukce, to umožňuje vysokou přesnost měření. Konstrukce je dvojího provedení, a to s pevným (Obr. č.30a) nebo pohyblivým (Obr. č.30b) portálem. U pevného se v ose „x“ pohybuje stůl. Naopak u pohyblivého je stůl upevněn na pevno a k pohyb vykonává portál. To má ovšem za následek omezený přístup. [1] [10] [16]



Obr. č 30 Portálové uspořádání CMM [16] a) s pevným portálem, b) s pohyblivým portálem

2.6.3 Pohyblivé části CMM a jejich způsoby uložení

Způsoby uložení a konstrukční řešení pohybů částí CMM je možné několika způsoby. Jsou na ně však kladeny požadavky jako je přímočarost, vzájemná kolmost, rozměrová stálost, minimalizace vůle nebo pasivní odpory s minimální silou. [10]

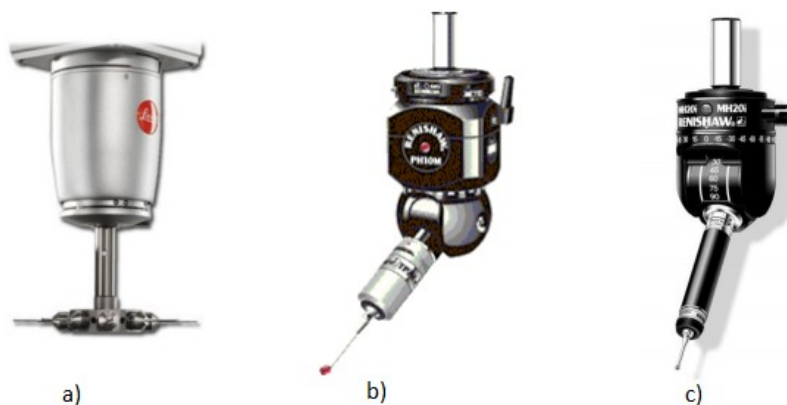
Kluzké uložení: použití u CMM malých rozměrů nebo pro třídy vyšší přesnosti měření. Nevýhodou je že uložení vyžaduje velký přísun maziva, trhavý pohyb posuvu a pohyb posuvu je malé rychlosti. Výhodou naopak je že se kvalita vedení uložení s přibývajícím časem zvyšuje, to v důsledku vede k vyšší přesnosti přístroje. Vysoká tuhost uložení k této přesnosti také přispívá. [11]

Valivé uložení: tento typ je známý vysokou odolností oproti opotřebení a také svým nízkým valivým odporem. Posuvové rychlosti jsou tedy vyšší než u kluzkého uložení. Konstrukce se řeší skrze kladky přesných rozměrů. Nejdokonalejším řešením jsou valivá hnízda. Toto konstrukční řešení napomáhá minimalizovat vliv mikro nerovností. Uložení splňuje podmínky na něj kladené i při velkých zatíženích. [10]

Aerostatické uložení: mezi pohyblivými částmi CMM vytvoří vzduchový polštář velice malé šířky. To v rozmezí od 4–8 μm . Není tedy nutné mazivo a části netrpí vzájemným třením. Výhodou je minimální odpor uložení, jeho vysoká tuhost a také potlačení vlivu nerovností povrchu. [10]

2.6.4 Snímací hlavice CMM

Základní rozdělení snímacích hlav je na pevné (Obr. č.31a) a indexovatelné (polohovatelné, otáčecí). Pevné zajišťují vyšší přesnost, ale nedají se natáčet. Indexovatelné hlavice se mohou polohovat v pracovním prostoru stroje. Dělíme je dále na motorické (Obr. č.31b) se servopohonem a manuální (Obr. č.31c), kdy je potřeba provést změnu polohy ručně. [10] [11]



Obr. č 31 Snímací hlavice CMM [10]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části bylo úkolem porovnat dvě metody 3D skenování a to metodu optickou a metodu dotykovou. Měření tedy bylo provedeno na dvou odlišných zařízeních. Prvním byl optický skener od firmy GOM typu ATOS Core 185, měření bylo provedeno v Polsku na technické univerzitě v Poznaně. Druhým použitým zařízením byl souřadnicový měřicí troj od firmy Wenzel typu LH65 X3M Premium, který se nachází na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostrava. Díky provádění měření za pomoci dvou odlišných zařízení pracující na jiné metodě vyhodnocení naměřených výsledků, bylo umožněno vzájemné srovnání hodnot. Měření se provádělo na vnitřní a vnější části kalibru. Hodnotily se odchylky tolerance válcovitosti, sousostí a odchylka od průměrů dle výkresové dokumentace.

3.1.1 ATOS Core 185

První měření kalibru se provádělo optickým mobilním zařízením ATOS Core 185, od firmy GOM (Obr. č.32a). Měření se uskutečnilo v Poznani - Poznan University of Technology, Institute of Mechanical Technology, Department of Metrology and Measurement Systems.

Princip optického měřicího zařízení je založen snímání projektorem s dvěma CCD kamerami. Projektor je umístěn uprostřed a směřuje kolmo k měřené součásti. Zbýlé dvě CCD kamery s vysokým rozlišením jsou natočeny pod úhlem. Jedná se o speciální technologii Triple Scan od firmy GOM (Obr. č. 32b). Ta dovoluje snímat objekt ze tří úhlů a tím zařízení zabírá větší plochu součásti a také plochy pod úhlem. V důsledku to znamená menší počet potřebných snímků, vyšší kvalitu skenování a zkrácený čas celkového skenování součásti. Projektor na součást promítá vzor světla a jeho následné zakřivení při nerovnosti snímají kamery. Software z těchto záběrů vypočítává prostorové souřadnice jednotlivých bodů. Zařízení využívá technologii modrého světla a laserového odměřování vzdálenosti. Díky zmíněné technologii modrého světla je zařízení schopno přesně měřit bez problémů s lesknoucím se povrchem. Zařízení je upevněno na stativu, a sestavení netrvá dlouho. Nespornou výhodou je jeho mobilita, jednoduchost skenování a rychlost kterou je skenování prováděno. Zařízení slouží k měření malých a středně velkých objektů. [6] [7]



Obr. č 32 a) Zařízení ATOS Core 185 b) Technologie Triple Scan [7]

Zařízení má uplatnění v mnoha oblastech, například kontrola kvality, reverzní inženýrství, přímé obrábění, kontrola kolize, atd. Jeho technické údaje můžeme vidět na tab. č.2. [6]

Tab. č. 2 ATOS Core 185 [7]

Technické údaje:	ATOS Core 185
Měřená plocha	185 x 140 mm
Pracovní vzdálenost	440 mm
Hustota bodů	0,07 - 0,12 mm
Rozměry senzoru	361 x 205 x 64 mm
Hmotnost	2,9kg
Provozní teplota	+5°C- +40°C

Výstup digitalizace:

- mrak bodů (3D souřadnice bodů),
- optimalizovaná polygonální síť (STL),
- řezy,
- protokoly měření (PDF, Word, HTML),
- barevné vyobrazení odchylek od hodnot modelu v CAD systému.

Software pro práci s zařízením ATOS:

ATOS professional

Software určený k řízení 3D skeneru, který nám vytváří 3D data naskenovaného povrchu a poskytuje intuitivní nastavení různých parametrů pro vybrané použití skeneru.

Další nadstavbou analyzování naměřených 3D dat se používá software **GOM Inspect**, který srovnává naměřené hodnoty s hodnotami z CAD modelu a určuje jejich odchylky.

Příprava kalibru:

Kalibr byl důkladně očištěn a odmaštěn pro zabránění odchylkám měření, které by případné nečistoty způsobily. Díky možnosti nasnímání kalibru za pomoci technologie modrého světla nebylo zapotřebí křídového nástřiku, který zabraňuje lesknutí povrchu. Dále se na kalibr umístily referenční značky. Ty slouží softwaru k následnému spojení jednotlivých skenovacích obrazů a vytvoří za pomoci těchto značek z obrazů jeden objekt.

Kontrola skeneru

Za prvé je potřeba zkontrolovat zařízení jako celek. Dalším krokem je kontrola připojení konektorů mezi senzorem, jednotkou senzoru a ovládáním PC. Z důvodu, že při pozdějším připojení některého z konektorů by za běhu zařízení, mohlo dojít k nenávratnému poškození systému. Posledním krokem kontroly je sejmutí krytek na čočky a objektivy.

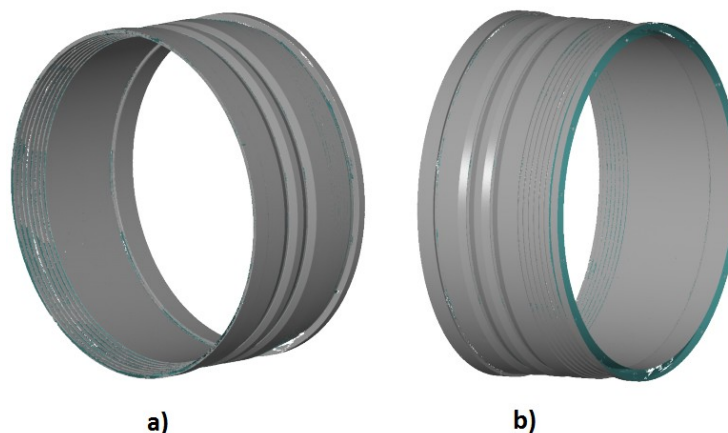
Kalibrace skeneru

Kalibrace se musí provádět za provozní teploty, je tedy vhodné nechat přístroj zapnutý po dobu 5 – 10 minut, než se kalibrace provede. Před skener je umístěn kříž, nebo kalibrační deska na vzdálenost měřícího objemu. Za prvé zvolíme záložku senzor v menu poté pokračujeme na záložku calibration, tím se ním otevře dialogové okno. Zde zadáme jednotlivé veličiny, jako jsou typ kalibračního elementu (kříž, deska), teplota měření, ohnisková vzdálenost měřeného objemu. Po spuštění kalibrace provede zařízení snímky při různém natočení kamery. V průběhu kalibrace systém jednotlivé snímky vyhodnocuje a vytvoří nám závěrečnou zprávu. Kalibrační odchylku projektoru musí být v rozmezí 0,014 až 0,028 pixel. Kalibrace zobrazila odchylku 0,016 při teplotě 22.7 °C, proběhla tedy v pořádku.

Postup skenování kalibru na ATOS Core 185:

Před započítím samotného skenování je zapotřebí v softwaru založit nový projekt a vyplnit informace o názvu souboru. Skenovaný objekt se umístí před snímací hlavu přístroje na pracovní stůl ve vzdálenosti, kterou nám určují osové kříže. Projekční jednotka nám na dílec promítne vzor, který současně snímají dvě CCD kamery. Software po pořízení snímku vypočítá mraky bodů v prostoru, které jsou spojovány do 3D modelu. Po nasnímání kompletního dílu je vytvořený model zpolygonizován a připraven k vyhodnocování. Skenování bylo provedeno na vnitřních (Obr. č.33a) a vnějších

průměrech (Obr. č. 33b). Zde lze vidět barevně odlišené odchylky od CAD modelu. Po celou dobu měření byl aktivovaný senzor detekci vibrace.



Obr. č 33 Skenování a) vnitřní b) vnější části kalibru

3.1.2 Wenzel LH65CNC X3M Premium

Druhý byl použitý kontaktní souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65CNC X3M Premium (Obr. č. 34), který se nachází na Vysoké škole báňské - Technické univerzitě Ostravě, Fakultě strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

Jedná se o souřadnicový měřicí stroj se zvýšenou přesností měření s CNC řízením. Dosahuje vysoké přesnosti a splňuje všechny požadavky a pokyny kladené normou ISO 10360-2. Nejistoty stroje dle normy jsou:

- $MPE_e = 1,6 + (L/350) \mu m$,
- $MPE_p = 1,6 \mu m$,
- $MPE_{thp} = 2,2 \mu m$ (pro sondu SP25).

Princip stroje je založen na dotykovém měření za pomoci spínací měřicí 3D hlavy. Snímač při každém dotyku s objektem zaznamená polohu tří os (X,Y,Z) v kartézské soustavě stroje a ukládá polohu bodu do paměti. Tímto způsobem může nasnímat nespočetné množství bodů, které ve výsledku vytvoří síť bodů odpovídající tvaru součásti. [14] [10]



Obr. č 34 Wenzel LH65CNC X3M Premium

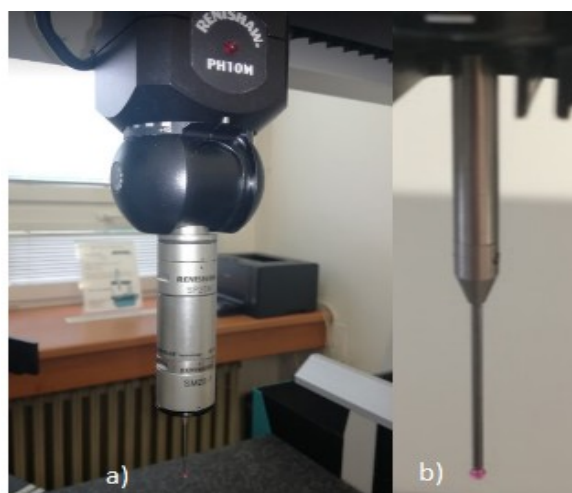
Parametre souřadnicového měřicího stroje WENZEL LH65 X3M Premium:

Měřicí rozsah:

- osa X: 650 mm,
- osa Y: 1000 mm,
- osa Z: 500 mm.

Snímací systém (Obr. č. 35a,b):

- motorická indexovatelná hlava: PH10M,
- měřicí sonda: SP25M,
- modul: SM25-1,
- průměr doteku referenční kuličky: 1,5 mm,
- délka doteku: 30 mm.



Obr. č 35 Snímací systém

a) Motorická indexová hlava Renishaw PH10M s měřicí sondou SP25M, b) snímací dotyk

Použitý software pro práci se strojem Wenzel LH65CNC X3M Premium:

Metrosoft QUARTIS R6 - Software od firmy Wenzel. Umožňuje měřit geometrie objektů, různé kontury, nebo obecné plochy zadané v CAD formátu.

Výstupy digitalizace:

- měření geometrických elementů,
- porovnání naměřených hodnot ploch a křivek s CAD modelem,
- digitalizace objektů a měření přesnosti 2D a 3D křivek či ploch,
- reverze engineering,
- offline programování.

Kalibrace stroje Wenzel LH65CNC X3M Premium

Před měřením je samozřejmostí vizuální kontrola stroje jako celku a jeho částí. Kalibrace se provádí pomocí referenční koule s konstantní křivostí a průměrem $d_1 = 24,99900$ mm. Použitá referenční koule umožňuje rozsah kalibrace do 180° . Pro přesné měření se doporučuje provést kalibraci, před každým novým měřením.

U softwaru Metrosoft QUARTIZ R6 lze provádět kalibraci třemi způsoby: [14]

- **Manuálně:** kalibrace na rovníku za pomoci bodové metody o 5 – 6 bodech.
- **Poloautomaticky:** Snímací hlava se natočí do požadované polohy a poté je zpuštěna funkce kalibrace.
- **Automaticky:** Předem kalibrovaná pozice doteku. Stačí zapnout funkci kalibrace.

Příprava a způsob upnutí kalibru:

Pro přesné měření je zapotřebí očistit a odmastit součást a zbavit ji případných nečistot. Poté součást upneme za pomoci upínek ke granitovému stolu, aby se zabránilo posunutí a následným chybám při měření (Obr. č. 36).

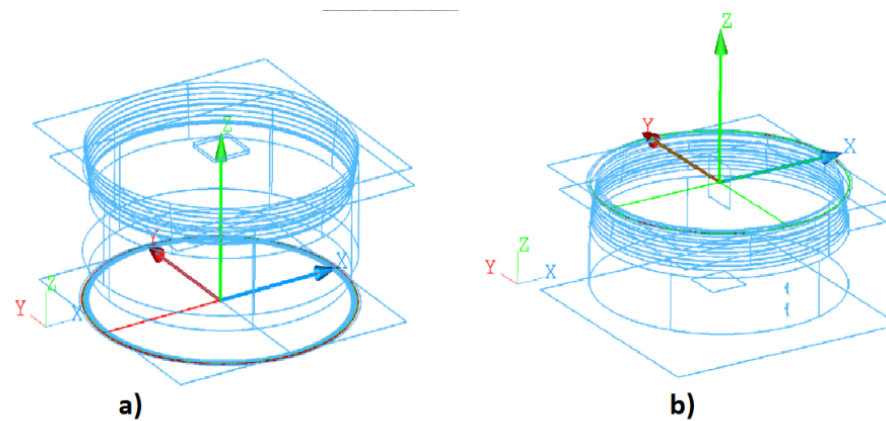


Obr. č 36 Upnutí kalibru pro měření na CMM

a) vnitřní část kalibru b) vnější část kalibru

Postup měření kalibru na stroji Wenzel LH65CNC X3M Premium

Měření probíhalo následovně, po zapnutí stroj se nechá chvíli běžet, aby se zahřál stroj na provozní teplotu. Teplota místnosti a kalibru, musí být vytemperovaná na $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Za prvé se provede se kalibrace dotyku za pomoci kalibrační koule. Následuje vytvoření programu, kde se nastaví veškeré parametre stroje, koeficient roztažnosti materiálu kalibru a teploty stroje a součásti. Vybere se vhodná metoda základního vyrovnání kalibru, kde se odeberou všechny stupně volnosti měřené součásti. Dále se naměří vybrané elementy pro základní vyrovnání a jsou aplikovány základní metody. Poté se nasnímají body kalibru a sestaví se geometrické elementy, následně se tyto elementy nasnímají a na jejich základě je uskutečněno hrubé vyrovnání součásti, následně se přejde do CNC režimu. Dalším krokem je nasnímání geometrických elementů za pomoci většího počtu bodů a znovu se provede vyrovnání v CNC režimu. Poté se nasnímají body geometrie a to buď kontaktně, nebo funkcí skening, přiřadí se geometrie a následně se vyhodnotí výsledky, s porovnáním dle výkresové dokumentace. Pro tolerance válcovitosti a souososti byla využita funkce skening. Naopak pro měření odchylek a průměrů bylo využito funkce kontaktního měření, kde je počet naměřených bodů menší. Měření bylo provedeno z vnější a vnitřní části kalibru (Obr. č. 37).



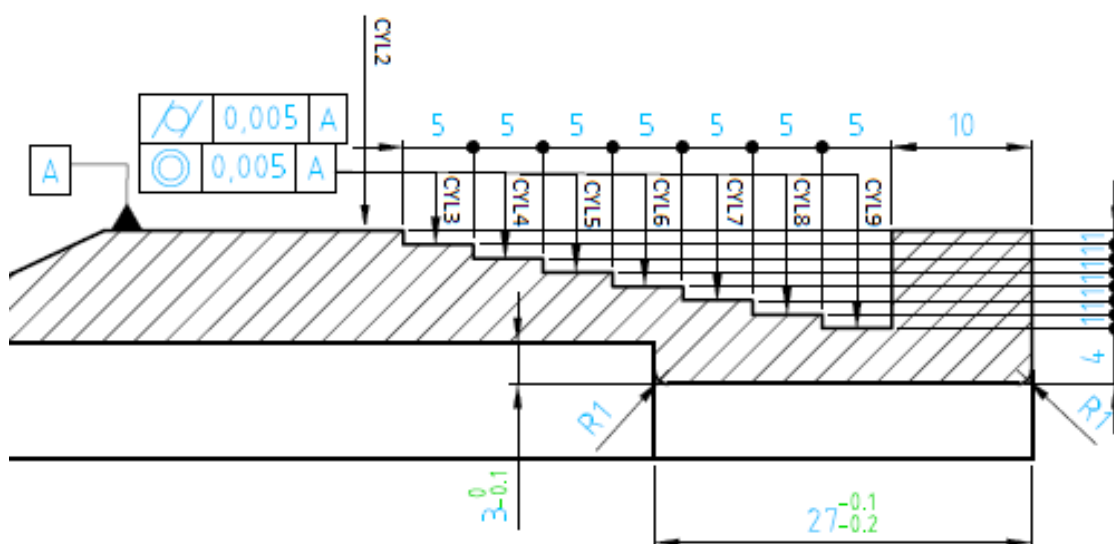
Obr. č 37 Schéma drátového modelu a jeho souřadný systém v programe QUARTIS R6
a) vnitřní část b) vnější část

3.2 Vyhodnocení optické a dotykové metody

V experimentální části se provádělo měření geometrických tolerancí a odchylek od průměrů, které udává výkresová dokumentace. Naměřené hodnoty byly porovnány v grafech a tabulkách. Měření proběhlo na vnější a vnitřní části kalibru.

3.2.1 Porovnání naměřených hodnot vnější části kalibru

Měření na vnější části bylo uskutečněno skrze vybrané prvky kalibru s označením CYL2 – CYL9 (Obr. č. 38).

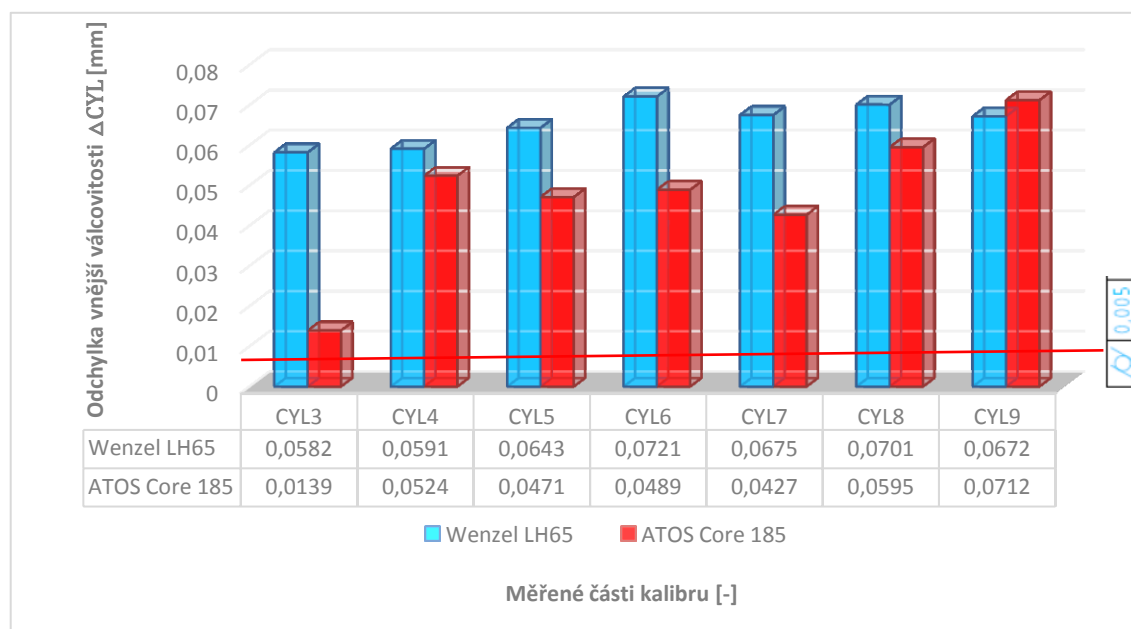


Obr. č 38 Zobrazení jednotlivých vnějších částí na výkresové dokumentaci

Odchylky tolerance válcovitosti:

Tab. č. 3 Naměřené hodnoty válcovitosti pro vnější části kalibru

Vnější části	Nominální hodnota tolerance válcovitosti [mm]	Wenzel LH65		ATOS Triple Scan	
		Naměřená hodnota [mm]	Odchylka válcovitosti [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka [mm]
CYL3	0 - 0,005	0,0582	0,0582	0,0139	0,0139
CYL4	0 - 0,005	0,0591	0,0591	0,0524	0,0524
CYL5	0 - 0,005	0,0643	0,0643	0,0471	0,0471
CYL6	0 - 0,005	0,0721	0,0721	0,0489	0,0489
CYL7	0 - 0,005	0,0675	0,0675	0,0427	0,0427
CYL8	0 - 0,005	0,0701	0,0701	0,0595	0,0595
CYL9	0 - 0,005	0,0672	0,0672	0,0712	0,0712



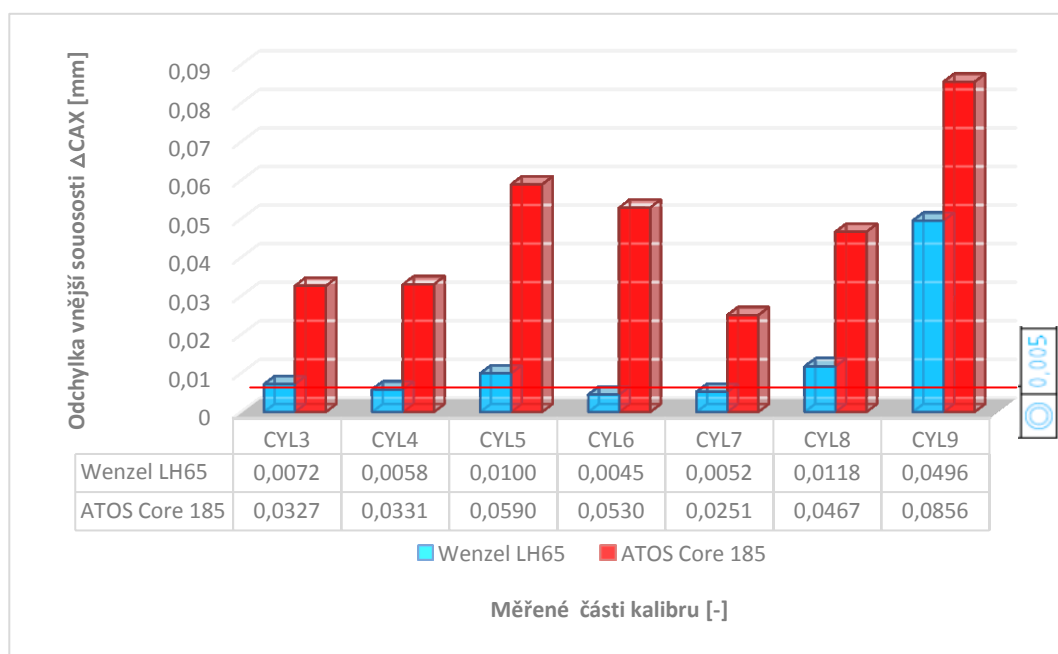
Obr. č 39 Graf odchylek tolerance válcovitosti pro vnější část kalibru

Při měření odchylky válcovitosti u vnějších průměrů byla na stroji Wenzel LH65 u průměru s označením CYL6 s hodnotou 0,0721 mm a nejnižší u prvního průměru CYL3 s hodnotou 0,0582 mm. Zařízení ATOS Core 185 naměřilo největší odchylku 0,0712 mm u průměru CYL9 a nejnižší odchylku jako první stroj u průměru CYL3 s hodnotou 0,0139 mm. Ani jedna z naměřených hodnot nesplňuje rozmezí zadané výkresovou dokumentací.

Odchylky tolerance souososti:

Tab. č. 4 Naměřené hodnoty souososti pro vnější části kalibru

Vnější části	Nominální hodnota tolerance souososti [mm]	Wenzel LH65		ATOS Triple Scan	
		Naměřená hodnota [mm]	Odchylka souososti [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka souososti [mm]
CYL3	0 - 0,005	0,0072	0,0072	0,0327	0,0327
CYL4	0 - 0,005	0,0058	0,0058	0,0331	0,0331
CYL5	0 - 0,005	0,0100	0,0100	0,0590	0,0590
CYL6	0 - 0,005	0,0045	0,0045	0,0530	0,0530
CYL7	0 - 0,005	0,0052	0,0052	0,0251	0,0251
CYL8	0 - 0,005	0,0118	0,0118	0,0467	0,0467
CYL9	0 - 0,005	0,0496	0,0496	0,0856	0,0856



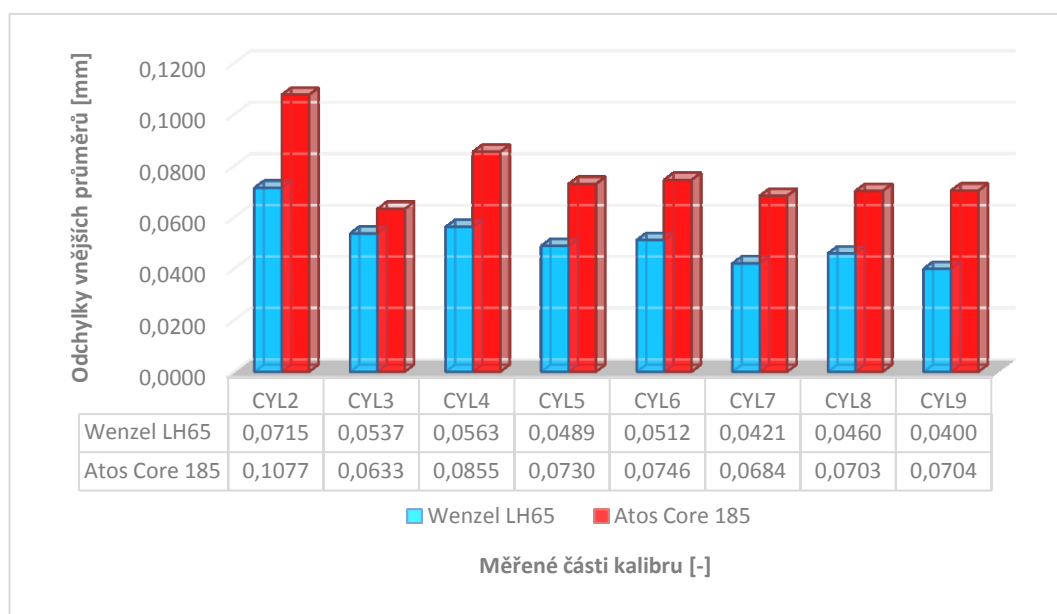
Obr. č 40 Graf odchylek souososti vnějších průměrů

Při měření odchylek souososti vnějších průměrů byla pro stroj Wenzel LH65 nejvyšší odchylka 0,0496 mm u průměru CYL9. Naopak nejnižší u průměru CYL6 s hodnotou 0,0045 mm. U druhého zařízení s označením ATOS Core 185 byla také odchylka nejvyšší u průměru CYL9 s hodnotou 0,0856 mm a nejnižší u CYL7, kde nabývala hodnoty 0,0251 mm. Jediná odchylka, která splňuje toleranci souososti byla naměřena u stroje Wenzel LH65. Nabývala hodnoty 0,0045 mm.

Odchylky od průměrů vnější části kalibru:

Tab. č. 5 Naměřené odchylky od vnějších průměrů

Průměr vnější	Nominální hodnota [mm]	Wenzel LH65		ATOS Core 185	
		Naměřená hodnota [mm]	Odchylka od průměru [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka od průměru [mm]
CYL3	328,0000	328,0537	0,0537	328,0633	0,0633
CYL4	326,0000	326,0563	0,0563	326,0855	0,0855
CYL5	324,0000	324,0489	0,0489	324,0730	0,0730
CYL6	322,0000	322,0512	0,0512	322,0746	0,0746
CYL7	320,0000	320,0421	0,0421	320,0684	0,0684
CYL8	318,0000	318,0460	0,0460	318,0703	0,0703
CYL9	316,0000	316,0400	0,0400	316,0704	0,0704
CYL2	330,0000	330,0715	0,0715	330,1077	0,1077

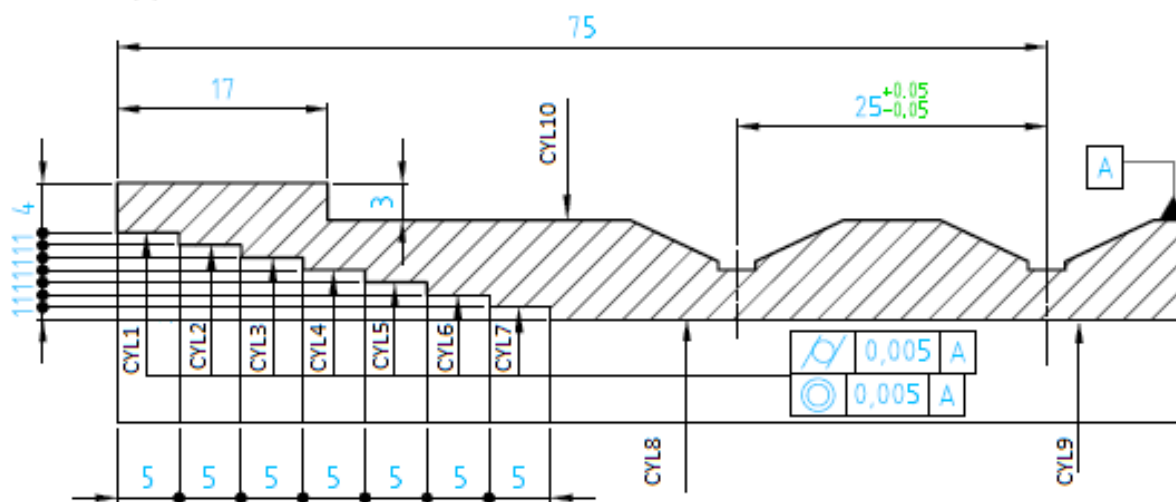


Obr. č 41 Graf odchylek vnějších průměrů

Měření odchylek od rozměrů průměrů dané z výkresové dokumentace ukázalo pro stroj Wenzel LH65 nevyšší odchylku 0,0715 mm u prvního průměru CYL2. U průměru CYL9 byla naopak nejnižší s naměřenou hodnotou 0,04 mm. Pro zařízení ATOS Core 185 byla zjištěna nejvyšší odchylka také jako u prvního stroje u prvního průměru CYL2 s naměřenou hodnotou 0,1077 mm. Nejnižší odchylka pro druhé zařízení byla naměřena u průměru CYL3 s hodnotou 0,0633 mm.

3.2.2 Porovnání naměřených hodnot vnitřní části kalibru

Měření na vnitřní části bylo uskutečněno skrze vybrané prvky kalibru s označením CYL1 – CYL10 (Obr. č. 42).

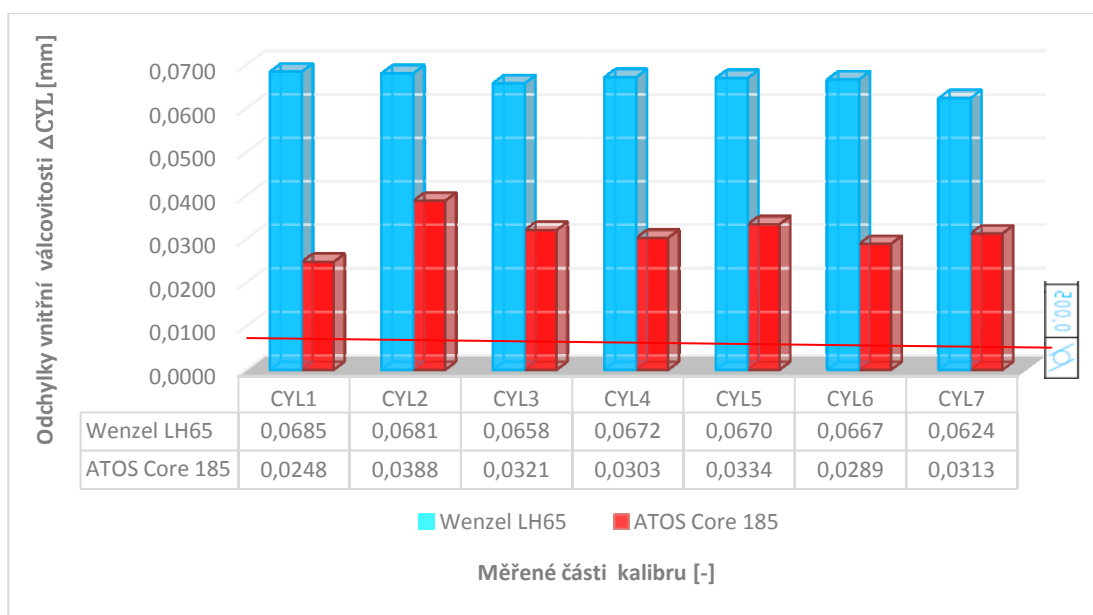


Obr. č 42 Zobrazení jednotlivých vnitřních částí na výkresové dokumentaci

Odchytky tolerance válcovitosti:

Tab. č. 6 Naměřené hodnoty válcovitosti pro vnitřní části kalibru

Vnitřní části	Nominální hodnota tolerance válcovitosti [mm]	Wenzel LH65		ATOS Core 185	
		Naměřená hodnota [mm]	Odchylka válcovitosti [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka válcovitosti [mm]
CYL1	0 - 0,005	0,0685	0,0685	0,0313	0,0248
CYL2	0 - 0,005	0,0681	0,0681	0,0289	0,0388
CYL3	0 - 0,005	0,0658	0,0658	0,0334	0,0321
CYL4	0 - 0,005	0,0672	0,0672	0,0303	0,0303
CYL5	0 - 0,005	0,0670	0,0670	0,0321	0,0334
CYL6	0 - 0,005	0,0667	0,0667	0,0388	0,0289
CYL7	0 - 0,005	0,0624	0,0624	0,0248	0,0313



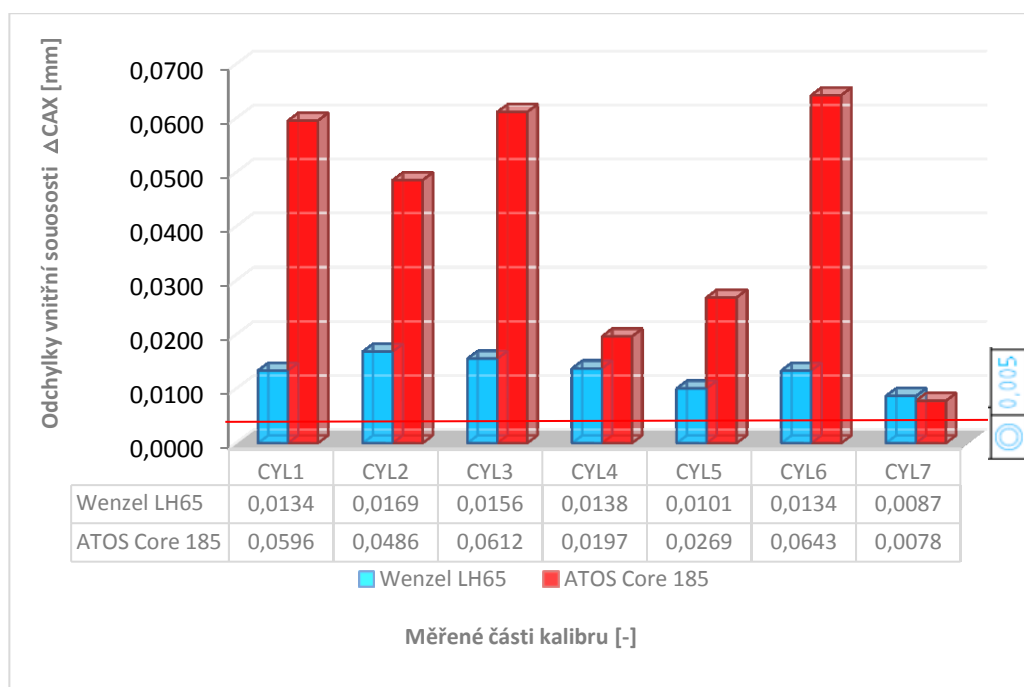
Obr. č 43 Graf odchylek válcovitosti vnitřních průměrů

Hodnoty pro stroj Wenzel LH65 byly po měření následující. Nejvyšší hodnoty 0,0685 mm nabýval u průměru CYL1. Naopak nejnižší 0,0624 mm u posledního vnitřního průměru CYL7. Zařízení ATOS Core 185 naměřilo nejvyšší odchylku u průměru CYL2, s hodnotou odchylky 0,0388 mm. Pro průměr CYL1 naměřilo zařízení odchylku 0,0248 mm, která byla celkově nejnižší. Žádná z naměřených odchylek nevyhovovala dané toleranci válcovitosti.

Odchylky tolerance souososti:

Tab. č. 7 Naměřené hodnoty souososti pro vnitřní části kalibru

Vnitřní části	Nominální hodnota tolerance souososti [mm]	Wenzel LH65		ATOS Core 185	
		Naměřená hodnota [mm]	Odchylka souososti [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka souososti [mm]
CYL1	0 - 0,005	0,0134	0,0134	0,0596	0,0596
CYL2	0 - 0,005	0,0169	0,0169	0,0486	0,0486
CYL3	0 - 0,005	0,0156	0,0156	0,0612	0,0612
CYL4	0 - 0,005	0,0138	0,0138	0,0197	0,0197
CYL5	0 - 0,005	0,0101	0,0101	0,0269	0,0269
CYL6	0 - 0,005	0,0134	0,0134	0,0643	0,0643
CYL7	0 - 0,005	0,0087	0,0087	0,0078	0,0078



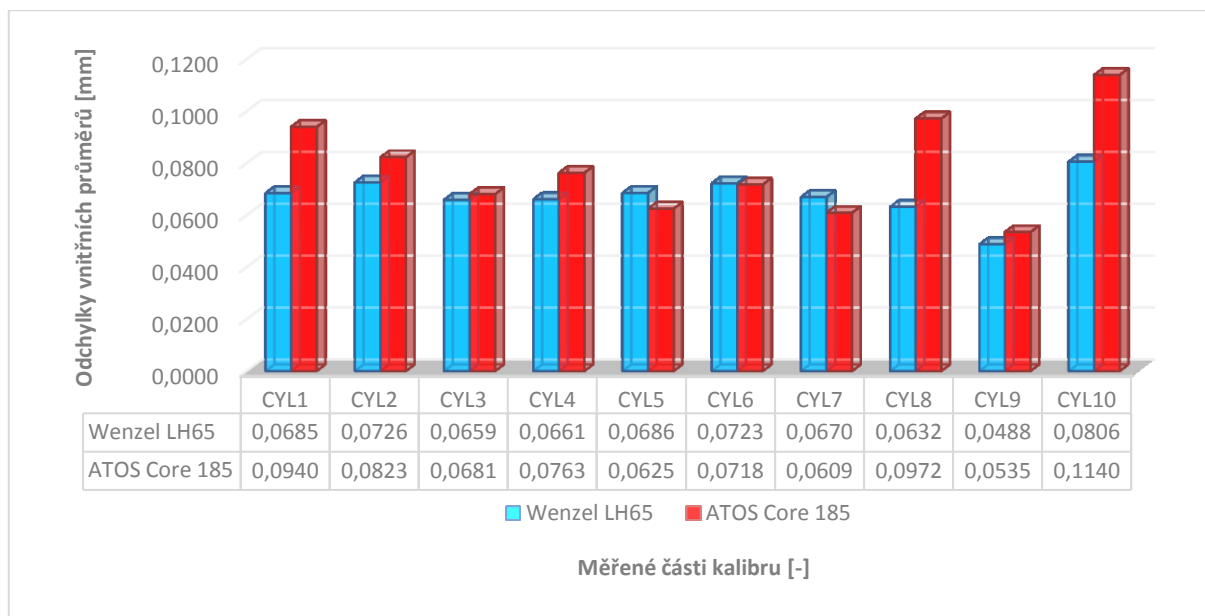
Obr. č 44 Graf odchylek souososti vnitřních průměrů

Po měření souososti byla pro stroj Wenzel LH65 zjištěna maximální odchylka 0,0169 mm u průměru CYL2. Minimální hodnoty 0,0087 mm nabývala u posledního průměru CYL7. Druhé zařízení ATOS Core 185 zaznamenalo nejvyšší odchylku u průměru CYL6, s hodnotou 0,0643 mm. Nejnižší odchylku stejně jako první stroj naměřilo u průměru CYL7. Hodnota odchylky u tohoto průměru činila 0,0078 mm. Dané toleranci souososti nevyhovovala ani jedna z naměřených hodnot.

Odchylky od průměrů vnitřní části kalibru:

Tab. č. 8 Naměřené odchylky od vnitřních průměrů

Průměr vnitřní	Nominální hodnota [mm]	Wenzel LH65		ATOS Core 185	
		Naměřená hodnota [mm]	Odchylka od průměru [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka od průměru [mm]
CYL1	328,0000	328,0685	0,0685	328,0940	0,0940
CYL2	326,0000	326,0726	0,0726	326,0823	0,0823
CYL3	324,0000	324,0659	0,0659	324,0681	0,0681
CYL4	322,0000	322,0661	0,0661	322,0763	0,0763
CYL5	320,0000	320,0686	0,0686	320,0625	0,0625
CYL6	318,0000	318,0723	0,0723	318,0718	0,0718
CYL7	316,0000	316,0670	0,0670	316,0609	0,0609
CYL8	314,0000	314,0632	0,0632	314,0972	0,0972
CYL9	314,0000	314,0488	0,0488	314,0535	0,0535
CYL10	330,0000	330,0806	0,0806	330,1140	0,1140



Obr. č 45 Graf odchylek vnitřních průměrů

Pro stroj Wenzel LH65 byly odchylky od zadaných průměrů následující. Nejvyšší odchylka byla naměřena u posledního měření průměru CYL10. Její hodnota byla 0,0806 mm. Nejnižší odchylka byla zaznamenána u průměru CYL9 a nabývala hodnoty 0,0488 mm. Druhé zařízení ATOS Core 185 zjistilo maximální hodnoty odchylky také u průměru CYL10 s hodnotou 0,114 mm. Minimální hodnotu odchylky 0,0535 mm naměřil u předposledního průměru CYL9.

4 ZÁVĚR

Výsledkem bakalářské práce bylo seznámit čtenáře s problematikou měření geometrických tolerancí a odchylek od zadaných rozměrů. Způsoby a zařízeními používanými k tomuto měření a výsledným porovnáním zvolených metod. Zvolenými metodami byly optické a dotykové metody. Porovnání bylo uskutečněno za pomoci naměřených hodnot odchylek tolerance válcovitosti, souososti a odchylek od průměrů kalibru dané z výkresové dokumentace.

Tolerance válcovitosti a souososti byla dána hodnotou 0,005 mm. Vzhledem k tomu že se jedná o tenkostěnnou součást bylo skoro nemožné dosáhnout takové přesnosti z výroby. To se potvrdilo naměřenými hodnotami, kde vyhovovala toleranci pouze jedna hodnota z vnější i vnitřní části. Naměřena byla u vnější části kalibru a to u tolerance souososti s hodnotou 0,0045 u části kalibru s označením CYL6 na stroji Wenzel LH65CNC X3M Premium. Pro toleranci válcovitosti se vyskytla nejmenší odchylka při měření na ATOS Core 185 při měření na vnější části kalibru. Jednalo se o hodnotu 0,0139 mm u části kalibru s označením CYL3, ale danou toleranci překročila 2,5krát. Měřené odchylky průměrů pro vnější i vnitřní část vykazovali obdobné hodnoty u obou přístrojů. Přesnější a s menšími výkyvy byl ovšem přístroj Wenzel LH65CNC X3M Premium.

Při porovnání výsledků v experimentální části se potvrdilo, že souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65 má vyšší přesnost měření a odchylky se od sebe výrazně neliší. Oproti tomu optický zařízení ATOS Core 185 nabýval odchylek různých hodnot a nebyly tak stejnoměrné jako u dotykové metody. Z časového a ekonomického hlediska byla jednoznačně výhodnější a jednodušší optická metoda, kde měření i s kalibrací a přichystáním součásti nezabralo více než 45 minut a měření je realizováno jednodušší cestou. Oproti tomu měření metodou dotykovou, kde kalibrace trvá okolo 15 minut, příprava součásti a programu kolem 11 hod a samotné měření jedné strany kalibru okolo 20 minut. V součtu tedy dotyková metoda trvá několikanásobně více času. S přibývajícím časem se samozřejmě zvyšují ekonomické náklady.

Z hlediska přesnosti je tedy dotyková metoda přesnější ale jedná se o zájem uživatele, jestli vyžaduje rychlost a efektivitu měření jakou se vyznačuje optická metoda. Nebo dbá na důležitou přesnost kontroly rozměru, například pokud budou výrobky použity v prostředí s vysokými požadavky na přesnost.

Z hlediska ekonomického je výhodnější přístroj ATOS CORE 185 a to díky rychlosti měření, možnostem práce s naměřenými daty a menším pořizovacím nákladům.

Výběr zařízení, také ovlivňuje typ výroby, a to jestli se jedná o sériovou nebo kusovou. Dále také jestli přístroj dokáže měřit v požadovaných tolerancích, tedy jak vysokou přesnost vyžadujeme.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Měření rozměrů, tvaru, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií. Vid. 4. München, 2008.
- [2] OTRUSINOVÁ, Lenka. Analýza měření odchylky kruhovitosti na optickém měřicím zařízení [online]. Ostrava 2010 [cit. 2017-03-03]. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Lenka Čepová, Ph.D.
- [3] TVARDEK, Michal. MOŽNOSTI MĚŘENÍ GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI OBROBKU [online]. Brno 2010 [cit. 2017-17-03]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
- [4] ČSN EN ISO 1101. Geometrická specifikace výrobků – Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení. Praha: Leden 2014. 120 s.
- [5] Technická dokumentace [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z:
<http://slideplayer.cz/slide/2505280/>
- [6] www.mcae.cz [cit. 2017-17-04]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/produkty/atos-triple-scan/>
- [7] www.capture3d.com [online]. [cit. 2017-12-04] Dostupné z:
<http://www.capture3d.com/3d-metrology-solutions/3d-scanners/atos-core>
- [9] NAVRÁTIL, Robert. Technologie skenování ve 3D [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.spsks.cz/wp-content/uploads/2016/03/Technologie-skenov%C3%A1n%C3%AD-ve-3D-0.pdf>
- [10] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [11] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1. 143 s.
- [12] ČSN EN ISO 10360-1. Geometrické požadavky na výrobky – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů. Praha. Září 2001. 44 s.

[13] TICHÁ, Š.: Strojírenská metrologie. Ostrava, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA

OSTRAVA, 2006. 112 s. ISBN 80 – 248 – 0671 – 1

[14] Metrosoft QUARTIS® R15 – Uživatelská příručka. 2015 Wenzel Mertomec AG, Chur.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č 1 Skutečná plocha a obalová plocha [2].....	13
Obr. č 2 Pole přímosti a zápis tolerance na výkrese [3].....	14
Obr. č 3 Pole rovinnosti a zápis tolerance na výkrese [3].....	15
Obr. č 4 Tolerance kruhovitosti a její zápis na výkrese [3]	15
Obr. č 5 Zápis tolerance válcovitosti na výkrese [3].....	16
Obr. č 6 Zápis tolerance na výkrese a znázornění tolerančního pole tvaru čáry [3]	16
Obr. č 7 Zápis tolerance na výkrese a znázornění tolerančního pole tvaru plochy [3]	17
Obr. č 8 Znázornění tolerance sklonu a zápis na výkresovou dokumentaci [5]	17
Obr. č 9 Ukázka tolerance kolmosti a zápis do výkresové dokumentace [5]	18
Obr. č 10 Ukázka tolerance rovnoběžnosti a zápis do výkresové dokumentace [5]	18
Obr. č 11 Značení tolerance souososti na výkresové dokumentaci [3].....	19
Obr. č 12 Značení tolerance soustřednosti na výkresové dokumentaci [3]	19
Obr. č 13 Zobrazení tolerance umístění na výkresové dokumentaci [3]	20
Obr. č 14 Zobrazení tolerance souměrnosti na výkresové dokumentaci [5].....	20
Obr. č 15 Zobrazení tolerance obvodového házení na výkr. dokumentaci [3]	21
Obr. č 16 Znázornění tolerance čelního házení na výkr. dokumentaci [3]	21
Obr. č 17 Znázornění tolerance celkového obvodového házení [3]	22
Obr. č 18 Znázornění tolerance celkového čelního házení [3]	22
Obr. č 19 Rozdělení 3D měření [1].....	26
Obr. č 20 Aktivní triangulace [10]	27
Obr. č 21 2D Triangulace [14]	28
Obr. č 22 3D Triangulace [10]	28
Obr. č 23 Laserová metoda referenčních značek [9]	29
Obr. č 24 Souřadnicový systém přístroje a měřeného objektu [10].....	30
Obr. č 25 Standartní uskupení CMM přístroje [11]	31

Obr. č 26 Jednosouřadnicový měřicí přístroj [10]	32
Obr. č 27 Dvousouřadnicový měřicí přístroj [10].....	32
Obr. č 28 Třisosouřadnicový měřicí přístroj [10].....	33
Obr. č 29 Základní geometrické uspořádání CMM [16].....	33
Obr. č 30 Portálové uspořádání CMM [16] a) s pevným portálem, b) s pohyblivým portálem	34
Obr. č 31 Snímací hlavice CMM [10].....	35
Obr. č 32 a) Zařízení ATOS Core 185 b) Technologie Triple Scan [7]	37
Obr. č 33 Skenování a) vnitřní b) vnější části kalibru	39
Obr. č 34 Wenzel LH65CNC X3M Premium.....	40
Obr. č 35 Snímací systém	40
Obr. č 36 Upnutí kalibru pro měření na CMM	42
Obr. č 37 Schéma drátového modelu a jeho souřadný systém v programe QUARTIS R6 a) vnitřní část b) vnější část.....	43
Obr. č 38 Zobrazení jednotlivých vnějších částí na výkresové dokumentaci	43
Obr. č 39 Graf odchylek tolerance válcovitosti pro vnější část kalibru	44
Obr. č 40 Graf odchylek souososti vnějších průměrů	45
Obr. č 41 Graf odchylek vnějších průměrů.....	46
Obr. č 42 Zobrazení jednotlivých vnitřních částí na výkresové dokumentaci	47
Obr. č 43 Graf odchylek válcovitosti vnitřních průměrů	48
Obr. č 44 Graf odchylek souososti vnitřních průměrů.....	49
Obr. č 45 Graf odchylek vnitřních průměrů.....	50

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Tolerance geometrických přesností [3].....	13
Tab. č. 2 ATOS Core 185 [7].....	37
Tab. č. 3 Naměřené hodnoty válcovitosti pro vnější části kalibru.....	44
Tab. č. 4 Naměřené hodnoty souososti pro vnější části kalibru.....	45
Tab. č. 5 Naměřené odchylky od vnějších průměrů	46
Tab. č. 6 Naměřené hodnoty válcovitosti pro vnitřní části kalibru.....	47
Tab. č. 7 Naměřené hodnoty souososti pro vnitřní části kalibru.....	48
Tab. č. 8 Naměřené odchylky od vnitřních průměrů	49

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Výkresová dokumentace kalibru. Číslo výkresu: STA0352 – KAL1

Příloha B – Naměřené hodnoty Wenzel LH65CNC X3M Premium

Příloha C – Naměřené hodnoty GOM ATOS Core 185